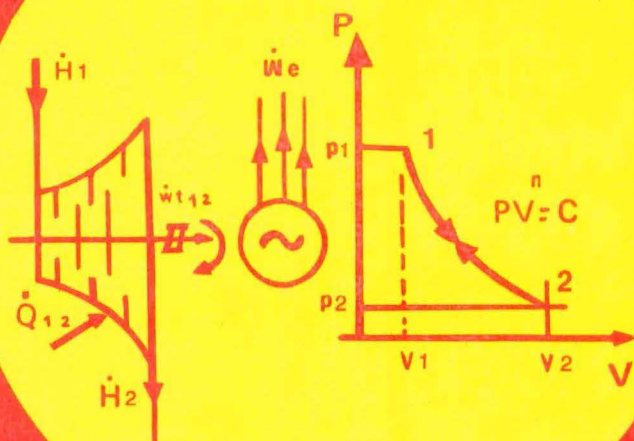


TERMODINAMICA I

Teoria y Problemas Resueltos

SISTEMA INTERNACIONAL



FRANK ANTONIO TORRES C.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU

FONDO EDITORIAL 1994

TERMODINAMICA I
Teoría y problemas resueltos

FRANK TORRES COBIAN

TERMODINAMICA I

Teoría y problemas resueltos



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU
FONDO EDITORIAL 1994

Primera edición: Junio de 1994

Diseño de Carátula: Frank Torres

Termodinámica I.
Teoría y problemas resueltos.

Copyright © 1994 por Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Av. Universitaria, cuadra 18 San Miguel. Lima, Perú. Telfs. 626390 y 622540 Anexo 220

Derechos Reservados

ISBN 84-89309-95-7

Prohibida la reproducción de este libro por cualquier medio, total o parcialmente, sin permiso expreso de los editores.

Impreso en el Perú - Printed in Peru

DEDICATORIA A MIS PADRES

Pensamiento:

«Quisiera penetrar en los conocimientos que Dios da, así como penetran las abejas en las flores para sacar la miel.»

Con el mayor reconocimiento y gratitud de hijo, este pequeño trabajo dedico a mis queridos padres Germán y Zoila.

Frank Torres Cobián.

Chorrillos, primavera de 1993

Lima, Perú.

AGRADECIMIENTO ESPECIAL

A la DIRECCION UNIVERSITARIA DE INVESTIGACION quien a través de su Director Doctor Luis Montestruque Zegarra, hizo posible el trabajo preliminar a la impresión (en Wordperfect, diskette y carátula).

A la Dirección Universitaria del Régimen Académico de Profesores en la persona del Reverendo Padre S.J. Manuel Marzal Fuentes, por su valiosa orientación para la realización de este trabajo.

Y finalmente, a los esfuerzos del fondo Editorial quien a través de su Director Doctor José Enrique Agüero, ha realizado la publicación del libro.

Con especial cariño, agradezco a mis hijos Gladys y Frank, quienes realizaron el tipeo en Wordperfect, los dibujos y carátula.

INTRODUCCION

El presente trabajo se ha realizado con el objeto de facilitar al estudiante de Ingeniería Mecánica el conocimiento y dominio de la termodinámica. Esta Primera Termodinámica trata única y exclusivamente a los procesos y ciclos termodinámicos como reversibles.

Ya en la Segunda Termodinámica estos mismos Procesos y Ciclos se los estudia tomando en cuenta la Irreversibilidad.

Creo que con esta Primera Termodinámica se inicia al estudiante en el conocimiento de la Termodinámica Básica, estableciendo los conceptos y los principios que hacen posible comprender como se realiza la transferencia y transformación de las diferentes formas de energía en los Procesos de Trabajo.

Asimismo adiestra al estudiante en el empleo de los planos (p-v), (t-s), (h-s) y (p-h); de las cartas generalizadas y psicrométricas; y de las tablas de propiedades termodinámicas, junto con las ecuaciones que relacionan las diferentes magnitudes de estado para evaluar los cambios de estado de los procesos que realiza un portador de energía en los diferentes sistemas termodinámicos.

Este trabajo está formado de seis partes y al final de cada una la aplicación inmediata que considero fundamental para el aprendizaje.

La parte I, establece las definiciones que se utilizan en Termodinámica. La parte II, estudia a las sustancias puras y establece definitivamente el comportamiento de los gases ideales y reales, además de la manipulación de los diagramas de estado, cartas y tablas de propiedades termodinámicas. La parte III establece las leyes que rigen el comportamiento de las mezclas de gases ideales. La parte IV, considera la aplicación de la Primera Ley a Sistemas Cerrados y Abiertos; y a Volúmenes de Control con variación de masa, se definen los cambios de estado que más se dan en los procesos de trabajo y se termina con el análisis de los Procesos Cíclicos, Positivos y Negativos. La parte V estudia la Segunda Ley en forma detallada para facilitar la comprensión en el concepto de la entropía y

del Trabajo máximo. La parte VI desarrolla las bases para la aplicación del Aire ambiente a Procesos de Aire acondicionado y Torres de Refrigeración.

Se ha adaptado el Sistema Internacional de Unidades debido a que su empleo se está generalizando en todas partes del mundo debido a su simplicidad en comparación con el Sistema Americano.

Quiero hacer presente que este trabajo es el producto de varios años que he venido enseñando el Curso en la Pontificia Universidad Católica y en otras universidades y Escuelas Técnicas Superiores, por lo que espero que sea de mucha utilidad a los estudiantes de INGENIERIA MECANICA.

También es digno de mencionar el aporte, en cuanto se refiere al incremento de conocimientos y a la nueva manera de enfocar el estudio de la Termodinámica, gracias a la cooperación de la Misión Holandesa a través de su experto el Ingeniero W.J.B. Van der Bergh.

Finalmente este trabajo es entregado a la Pontificia Universidad Católica para su publicación, en agradecimiento a sus autoridades que hacen posible la realización de sus profesores, estudiantes y trabajadores no docentes.

*Profesor Frank A. Torres Cobián.
Chorrillos, Primavera de 1993
Lima-Perú*

INDICE DE PARTES

PARTE I	17
NOCIONES FUNDAMENTALES Y DEFINICIONES EN LA TERMODINAMICA:	19
Definiciones. Sistemas termodinámicos. Portadores de energía. Equilibrio Termodinámico. Magnitudes y ecuaciones de estado. Cambios de estado o procesos Termodinámicos. Proceso Cíclico. Ley Cero de la Termodinámica. Formas de energía: El trabajo y sus clases. El calor. La entalpía. La entropía. El calor específico y sus variables. Variaciones de la energía interna, de la entalpía, de la entropía y sus relaciones con sus calores específicos para gases ideales. Relaciones entre C_p , C_v , R , \bar{R} y K .	
PARTE II	57
LAS SUSTANCIAS PURAS, LOS DIAGRAMAS DE ESTADO Y LAS CARTAS GENERALIZADAS.	59
La superficie termodinámica de una Sustancia Pura. Definiciones importantes. Los diagramas de estado: (p-t), (t-v), (p-v), (t-s), (h-s) y (p-h). La regla de las fases de Gibbs. Las tablas de propiedades Termodinámicas. Los gases y vapores reales e ideales. Las cartas generalizadas. Las ecuaciones de estado de los gases reales.	
PARTE III	105
MEZCLA DE GASES IDEALES	107
Definiciones importantes. Análisis volumétrico y Análisis gravimétrico de una mezcla de gases ideales. C_p , C_v , R , M y K , para una mezcla de gases ideales.	

PARTE IV	121
LA PRIMERA LEY DE LA TERMODINAMICA PARA PROCESOS Y CICLOS CUASIESTATICOS REVERSIBLES.	123
Enunciado. Proceso cuasiestático reversible. Ecuaciones de energía para procesos cuasiestáticos reversibles en Sistemas Cerrados y en Sistemas Abiertos. La reducción adiabática de una corriente estacionaria y el Coeficiente Joule-Thompson. Ecuación de energía para un volumen de control con variación de masa. Derivación del Polítropo General. Clases de procesos. Los diagramas de estado (T-s) y (h-s) para gases ideales. Las ecuaciones de energía para los procesos cíclicos cuasiestáticos reversibles. El rendimiento térmico y el Coeficiente de Performance para procesos cíclicos cuasiestáticos reversibles. Análisis general de los Ciclos Termodinámicos: Ciclo de Carnot.	
PARTE V	151
LA SEGUNDA LEY DE LA TERMODINAMICA PARA PROCESOS Y CICLOS CUASIESTATICOS REVERSIBLES.	153
Enunciados. Suma de Cantidades de calor reducido en procesos cíclicos cuasiestáticos reversibles cualesquiera. El cambio de entropía para procesos cuasiestáticos reversibles cualesquiera. El cambio de entropía para un volumen de control con variación de masa para un proceso reversible.	
PARTE VI	185
PSICROMETRIA (ESTUDIO DEL AIRE AMBIENTE).	187
Aire ambiente o aire húmedo. Propiedades del aire húmedo: Temperatura del punto de rocío. Humedad absoluta. Humedad relativa. Volumen específico del aire húmedo. Proceso de saturación adiabático. Temperatura del bulbo seco y Temperatura del bulbo húmedo. La carta psicrométrica. Procesos usuales de acondicionamiento de aire. Torres de refrigeración.	
APENDICE	217

PARTE I

1. DEFINICIONES EN LA TERMODINAMICA

TERMODINAMICA

- Parte de la Física que estudia las relaciones existentes entre los fenómenos dinámicos y caloríficos.
- Ciencia que trata con el calor y el trabajo y su relación con las propiedades de los Portadores de Energía (sustancias).
- Ciencia que trata de las transformaciones y transferencias de energía.
- Ciencia de la energía y de la entropía (la más moderna).

LEYES DE LA TERMODINAMICA

Ley Cero.- Cuando dos cuerpos tienen igual temperatura con un TERCER CUERPO, éste a su vez tiene igual temperatura con cada uno de los otros dos.

Primera Ley.- La energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma. Establece el balance energético y se aplica a procesos reversibles e irreversibles.

Segunda Ley.- El trabajo se puede transformar totalmente en calor, pero el calor no se puede transformar totalmente en trabajo. Determina el curso del proceso.

Tercera Ley.- La entropía de un cristal perfecto es cero a la temperatura del cero absoluto. Aplicable a sistemas que entran en reacción.

1.1 SISTEMA TERMODINAMICO

Cantidad fija de materia limitada por fronteras, las cuales pueden ser fijas o imaginarias y se pueden alargar o contraer. El sistema tiene su ambiente o alrededores que está exterior a las fronteras. Ej: Cilindro-Pistón.

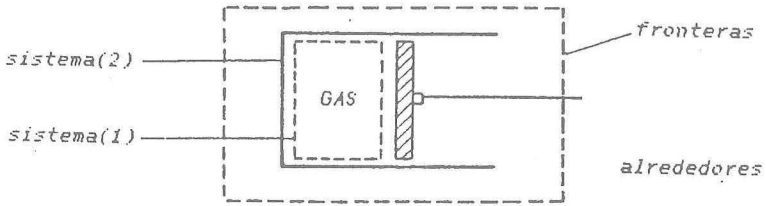


FIG. 1.1

1.1.1 SISTEMA CERRADO

Aquel donde no hay intercambio de materia con el ambiente. Ej: Depósito Cerrado.

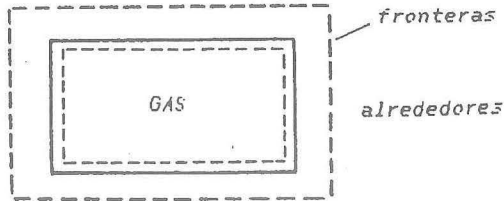


FIG. 1.2

1.1.2 SISTEMA ABIERTO

Aquel donde sí hay intercambio de materia con el ambiente. Ej: Compresor de aire.

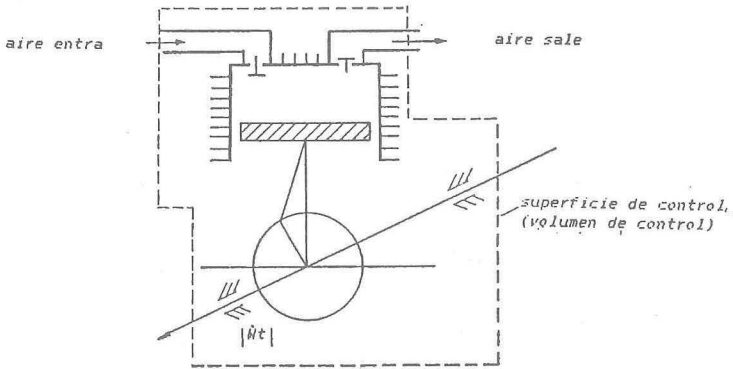


FIG. 1.3

1.1.3 SISTEMA ADIABATICO

Aquel en donde no hay intercambio de calor con los alrededores (abierto o cerrado).

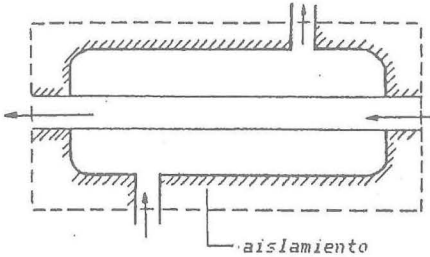


FIG. 1.4

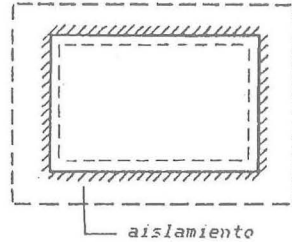


FIG. 1.5

1.1.4 SISTEMA AISLADO

Aquel donde no hay intercambio de materia ni de calor con los alrededores (por definición sería un sistema adiabático cerrado).

1.1.5 SISTEMA HOMOGENEO

Aquel en donde las propiedades químicas y físicas son iguales en todo el sistema. Ej: Depósito con Oxígeno Gaseoso (O_2), Tubería con Agua (H_2O) líquida.

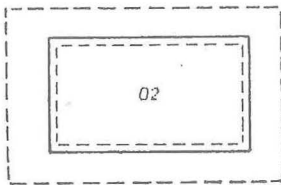


FIG. 1.6

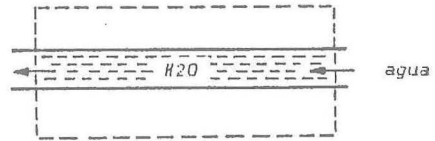


FIG. 1.7

1.1.6 SISTEMA HETEROGENEO

Aquel en donde hay dos o más fases de un portador de energía, permaneciendo igual la composición química. Ej: Depósito con Agua Líquida y Agua Vapor.

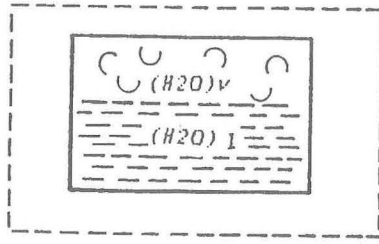


FIG. 1.8

1.1.7 SISTEMAS SENCILLOS

Sólidos, líquidos o gases, que no están influenciados por fenómenos: eléctricos, magnéticos o de tensión superficial.

1.1.8 PORTADOR DE ENERGÍA:

Medio o sustancia ligado a un cuerpo material que sirve para transportar y/o transferir energía en un determinado proceso de trabajo. Ej: Agua, Aire, Combustible, etc.

1.2 EQUILIBRIO TERMODINAMICO

En general el equilibrio puede ser: Metaestable, inestable o estable.

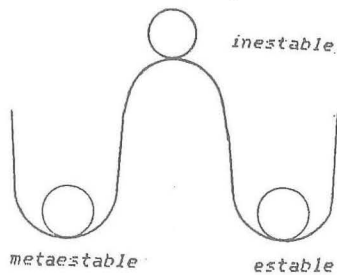


FIG. 1.9

E. METAESTABLE.- El sistema vuelve a su estado original si se produce una ligera perturbación, pero si la perturbación es de magnitud suficiente puede situarse en otro estado de equilibrio. Ej:

$H_2 + O$, permanece como mezcla
 $H_2 + O + \text{Chispa eléctrica} \rightarrow H_2O$ (varió el estado)

E. INESTABLE.- No vuelve a su estado original de equilibrio con una perturbación finita. Ej: Un lapiz largo apoyado en su base puede caerse.

E. ESTABLE.- Siempre vuelve a su estado original de equilibrio cuando ha sido perturbado. A esta clase de equilibrio nos vamos a referir en el curso.

Sin embargo, el equilibrio termodinámico involucra:

1.2.1 EQUILIBRIO MECANICO

Las fuerzas internas y externas del sistema deben estar en equilibrio, sino puede haber ondas y turbulencias en el sistema:

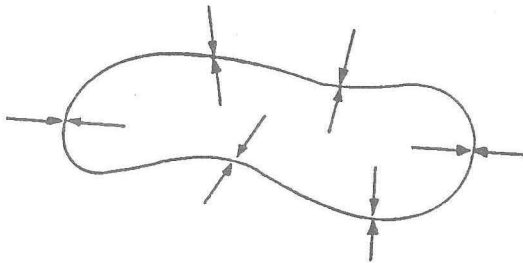


FIG. 1.10

1.2.2 EQUILIBRIO TERMICO

La temperatura debe ser igual en todo el sistema e igual a la temperatura del ambiente que lo rodea; a excepción de un sistema adiabático.

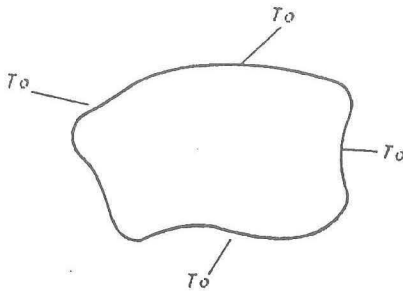


FIG. 1.11

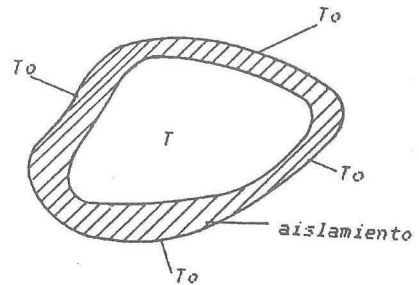


FIG. 1.12

Si el sistema se acelera puede haber una gradiente de temperatura respecto a los alrededores y entonces el sistema aumenta su temperatura.

1.2.3 EQUILIBRIO QUIMICO

La estructura y composición del sistema no debe variar. La variación de las fuerzas y de la temperatura puede alterar el equilibrio químico y originarse una reacción.

1.2.4 EL SISTEMA DEBE SER CERRADO

No debe haber ningun intercambio de materia con el ambiente.

1.3 MAGNITUDES Y ECUACIONES DE ESTADO

Parámetros o variables, con los cuales se fija el equilibrio termodinámico de un sistema (estado de un sistema). Ej: Considere un sistema cerrado.

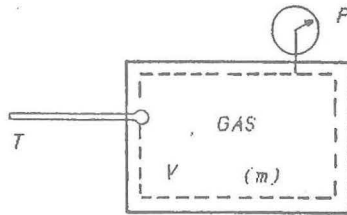


FIG. 1.13

PRESION.- Fuerza ejercida sobre una superficie.

$$P = \frac{F}{A} = \frac{m \cdot a}{A}$$

Las unidades se pueden expresar en: Kg/cm², bares, atmósferas, Pascales, Kilo Pascales, Mega Pascales, lb/pulg², etc., utilizándose las siguientes equivalencias:

$$\begin{aligned} 1.035 \text{ Kg/cm}^2 &= 10.35 \text{ m H}_2\text{O} = \\ 760 \text{ mm Hg} &= 14.7 \text{ Lb/pulg}^2 = \\ 1 \text{ bar} &= 10^5 \text{ Pa.} = 10^5 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

VOLUMEN.- Mide el tamaño físico o porción de espacio que ocupa el sistema.

$$V = m \cdot v$$

Las unidades se pueden expresar en: m³, cm³, mm³, dm³, lts., pie³, pulg³, utilizándose las siguientes equivalencias:

1 pie = 0.3048 m; 1 m = 100 cm;

1 pie = 12 pulg.

* Elevándose al cubo para obtener unidades de volumen.

MASA.- Es la cantidad de materia del sistema, expresándose en las siguientes unidades: Kgm, gm, lbm, utilizándose las siguientes equivalencias:

$$1 \text{ lbm} = 0.453 \text{ Kgm.}$$

TEMPERATURA.- Es la medida del grado del calor, expresándose en las siguientes unidades: °C, K, °F, R, utilizándose las siguientes equivalencias:

$$\frac{F-32}{180} = \frac{C}{100} = \frac{K-273}{100}$$

1.3.1 MAGNITUDES DE ESTADO INTENSIVAS

Son aquellas independientes de la cantidad de materia. Ej: La composición, la presión, la temperatura.

1.3.2 MAGNITUDES DE ESTADO EXTENSIVAS

Son aquellas que dependen de la cantidad de materia. Ej: La masa, el volumen, la energía total, la entropía total, la entalpía total.

Cuando estas unidades se expresan por unidad de masa, se llaman *propiedades específicas* y se tornan *magnitudes de estado intensivas*:

$$v = \frac{V}{m}, \quad h = \frac{H}{m}, \quad s = \frac{S}{m}, \quad e_c = \frac{E_c}{m}, \quad e_p = \frac{E_p}{m}$$

1.3.3 ECUACIONES DE ESTADO

Relación mútua existente entre las magnitudes de estado: P, V, m, T, e indi-

can cuánto varían las magnitudes de estado al variar el equilibrio del sistema. Ej:

$$\text{GASES IDEALES: } PV = m.R.T$$

$$\text{GASES REALES: } (P + a/V^2)(V - b) = m.R.T$$

1.4 CAMBIO DE ESTADO O PROCESO TERMODINAMICO

Paso de un estado de equilibrio a otro y durante el cual pueden variar las magnitudes de estado.

1.4.1 CAMBIO DE ESTADO NO ESTADICO

Es aquel en el cual las propiedades no están bien definidas y en el cual no puede calcularse el trabajo realizado. Ej:

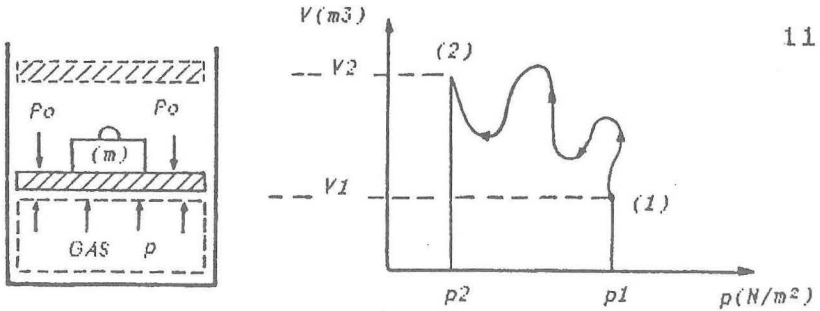


FIG. 1.14

- (1) Estado de equilibrio con el peso.
- (2) Estado de equilibrio sin el peso.

Al sacar bruscamente el peso de masa (m), el pistón puede subir y bajar varias veces, el volumen, la presión, la temperatura y la densidad no están bien definidas, apareciendo ondas y turbulencias en el sistema gaseoso.

1.4.2 CAMBIO DE ESTADO CUASIESTATICO O APROXIMADAMENTE CUASIESTATICO

Es aquel en el cual las propiedades están bien definidas y en el cual se podrá calcular el trabajo realizado. Ej:

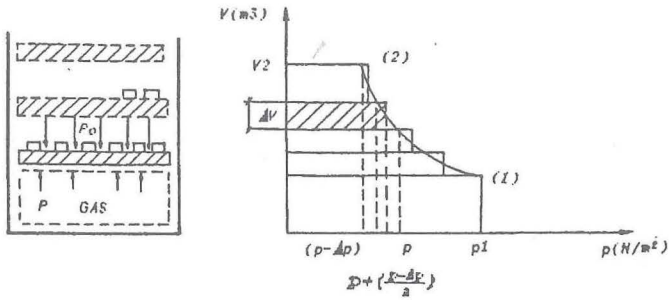


FIG. 1.15

Cada masa pequeña corresponde a una parte de la masa total (m), se sacan una por una estas masas de modo que no hay perturbación (ondas, turbulencias, oscilaciones) alguna en el sistema gaseoso. El equilibrio se restablece más rápido, por eso las magnitudes de estado están bien definidas.

$$\Delta W = \left(\frac{p + (p - \Delta p)}{2} \right) \cdot \Delta V$$

En el limite:

$$dW = \lim_{\Delta p \rightarrow 0} \left(\frac{p + p - \Delta p}{2} \right) \cdot \Delta V = p \cdot dv$$

$$\Delta p \rightarrow 0$$

$$\therefore W_{1,2} = \int_1^2 p \, dv, \text{ donde: } p = f(v)$$

1.4.3 CAMBIO DE ESTADO REVERSIBLE

Es el paso de un sistema de un estado de equilibrio a otro, pudiendo además regresar a su estado original de equilibrio sin intervención exterior, es decir que los alrededores no deben ser modificados. Ej:

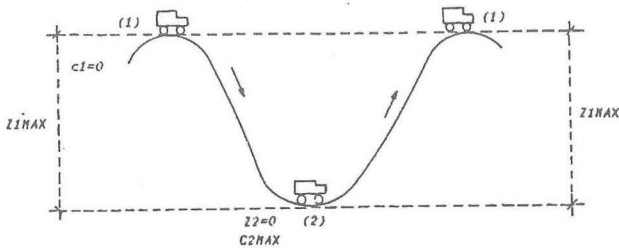


FIG. 1.16

Durante el proceso, no hay fricción ni disipación de calor.

ESTADO (1) : Energía potencial es máxima, energía cinética mínima.

ESTADO (2) : Energía cinética es máxima, energía potencial mínima.

1-2 Durante el proceso la energía potencial disminuye, pero la energía cinética aumenta, es decir que hay compensación de efectos.

2-1 Durante el proceso la energía potencial aumenta, pero la energía cinética disminuye, evidenciándose nuevamente la compensación de efectos.

Es decir, el sistema vuelve a su estado original de equilibrio sin haberse modificado los alrededores. El cambio de estado desarrollado es netamente REVERSIBLE.

1.4.4 PROCESO CICLICO REVERSIBLE

Son una serie de eventos en los cuales uno o más portadores de energía pueden sufrir dos o más cambios de estado, pudiendo regresar o no regresar a sus estados originales de equilibrio.

Por eso se distinguen los ciclos cerrados y los ciclos abiertos. Ej:

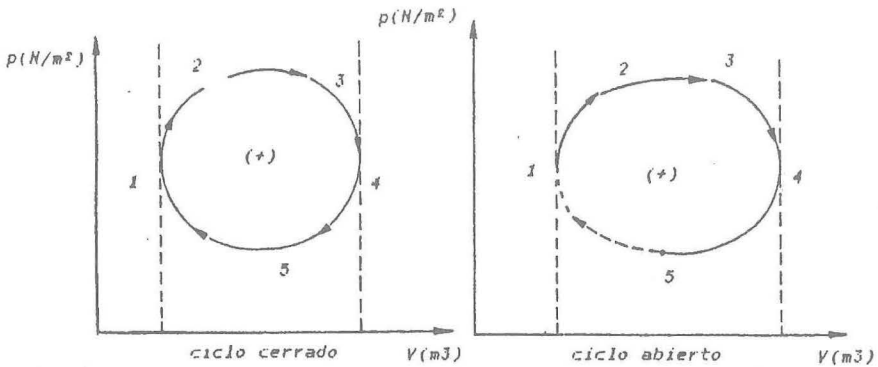


FIG 1.17

Una planta de refrigeración funciona como ciclo cerrado, mientras que los motores de combustión interna, las centrales de turbinas de gas, lo hacen como ciclos abiertos.

1.5 LEY CERO DE LA TERMODINAMICA:

IGUALDAD DE TEMPERATURA:



FIG. 1.18

Cuando están juntos, después de un tiempo tendrán el mismo calentamiento o la misma frescura.

Ahora supongamos que estos bloques son de material de aluminio.

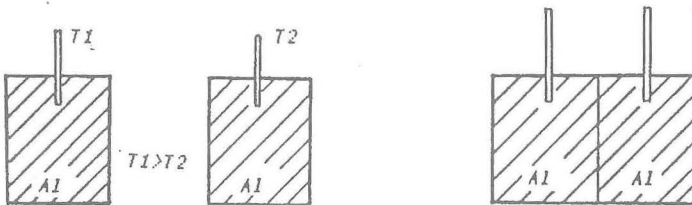


FIG. 1.19

- Resistencia eléctrica del bloque caliente disminuye con el tiempo, la del bloque frío se incrementa. Después de un tiempo no habrá diferencia alguna
- Longitud del bloque caliente disminuye con el tiempo, la del bloque frío se incrementa. Después de un tiempo no habrá diferencia alguna.
- Columna de mercurio del termómetro del bloque caliente bajará con el tiempo, la del bloque frío se incrementa. Después de un tiempo no habrá diferencia alguna.

Por consiguiente:

“Dos cuerpos que están en comunicación térmica, tienen igual temperatura cuando no hay cambio alguno en las propiedades observables”.

Ahora, separadamente los bloques y el termómetro:

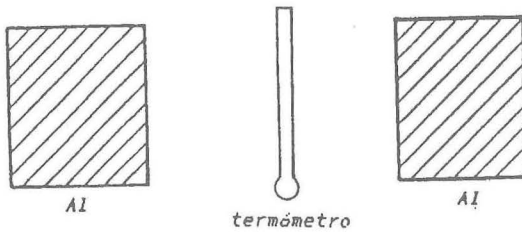


FIG.1.20

Si colocamos el termómetro en el primer bloque, se establecerá la igualdad de temperatura.

Luego colocamos el termómetro en el segundo bloque, se establecerá también la igualdad de temperatura al no haber cambio alguno en la altura de la columna de mercurio del termómetro.

Luego podemos decir que, ambos bloques están en equilibrio térmico con el termómetro.

Entonces podemos enunciar la ley cero como:

«Cuando dos cuerpos tienen igual temperatura con un tercer cuerpo, éste a su vez tiene igual temperatura con cada uno de los otros dos».

Esta ley es la base para la calibración de la escala de temperatura en un termómetro de mercurio.

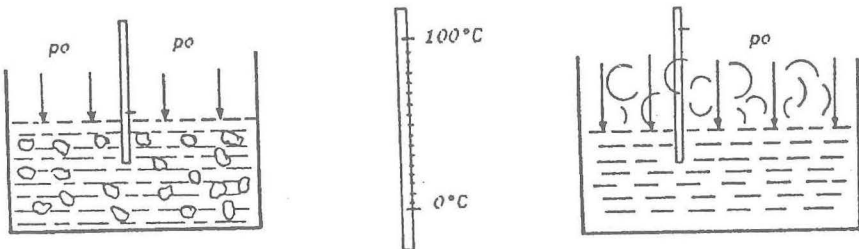


FIG. 1.21

Nivel cero (0): Mezcla de hielo machacado con agua a la presión atmosférica.

Nivel de Cien (100): Agua hirviendo a la presión atmosférica.

1.6 FORMAS DE ENERGÍA:

1.6.1 ENERGIA CINETICA

Tiene que ver con la velocidad de un cuerpo, sistema o portador

$$\begin{aligned} E_c &= 1/2 \cdot m \cdot c^2 & (\text{N-m}), \text{ J.} \\ \dot{E}_c &= 1/2 \cdot \dot{m} \cdot c^2 & (\text{N-m})/\text{s}, \text{ J/s.} \end{aligned}$$

1.6.2 ENERGIA POTENCIAL

Tiene que ver con la posición de un cuerpo, sistema o portador.

$$\begin{aligned} E_p &= m \cdot g \cdot z & (\text{N-m}), \text{ J.} \\ \dot{E}_p &= \dot{m} \cdot g \cdot z & (\text{N-m})/\text{s}, \text{ J/s.} \end{aligned}$$

1.6.3 ENERGIA ELECTRICA

Se debe al flujo de electrones, que circula por un conductor, obteniéndose la potencia eléctrica.

$$\begin{aligned} P &= V \cdot I & \text{V.A.}, (\text{W}), \text{ J/S} \\ V &= I \cdot R & \text{A. } \Omega, \text{ V} \\ P &= I^2 \cdot R & (\text{W}), \text{ J/S} \end{aligned}$$

1.6.4 ENERGIA QUIMICA

Está en los combustibles los cuales poseen energía química almacenada, la cual después de su oxidación y reacción libera una gran cantidad de calor. Ej: Gasolina (C_8H_{18}), Petróleo ($C_{12}H_{24}$).

1.6.5 ENERGIA INTERNA

Consideremos dos moléculas de cualquier portador de energía.

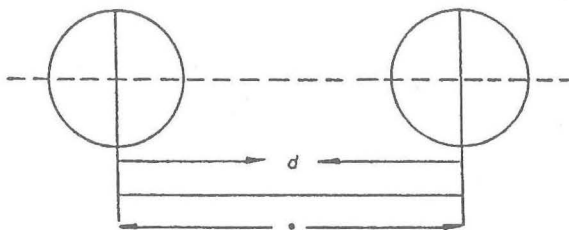


FIG. 1.22

Existen fuerzas de atracción y repulsión intermolecular que tienen que ver con el volumen (V) de las moléculas (Energía Potencial Intermolecular).

También las moléculas tienen: oscilaciones en los sólidos; oscilación, rotación y traslación en los líquidos y gases (Energía Cinética Intermolecular), la cual varía al variar la temperatura (T).

Es decir:

$$U = f(V,T)$$

$$du = (\delta u / \delta v)_T \cdot dv + (\delta u / \delta T)_V \cdot dT$$

variación variación

E. Potencial E. Cinética

- Magnitud de estado que no es medible directamente.
- Es una función de punto, diferencial exacta o entera.
- Depende del estado inicial y final de un proceso.

Podemos hacer las siguientes observaciones y simplificaciones:

- A las condiciones atmosféricas en los *gases*, la influencia de las fuerzas de atracción y repulsión intermoleculares es muy pequeña.
- En los *líquidos* y *sólidos*, la compresibilidad y dilatación son muy pequeñas.
- Por eso podemos considerar la distancia entre moléculas *d* constante, es decir que $dv = 0$.
- Entonces para gases, líquidos y sólidos, podemos escribir:

$$du = (\delta u / \delta T)_V \cdot dT$$

1.6.6 EL TRABAJO

Es el realizado por fuerzas externas que actúan sobre las fronteras de un sistema:

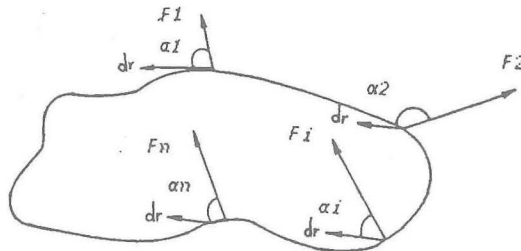


FIG. 1.23

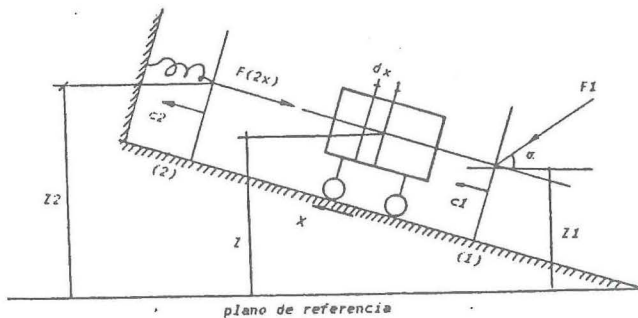
En General:

$$W = -\sum_{i=1}^{i=n} \vec{F}_i \cdot d\vec{r} = -\sum_{i=1}^{i=n} F_i \cdot dr \cdot \cos \alpha_i$$

Podemos distinguir:

1.6.6.1 TRABAJO MECANICO

Es el debido al desplazamiento del sistema entero. Consideremos la figura siguiente:



Plano de referencia

FIG. 1.24

$$W_{m1.2} = -\int_1^2 F_1 \cdot \cos \alpha \cdot dx + \int_1^2 F_{2(x)} \cdot dx$$

o también:

$$\begin{aligned} -W_{m1.2} &= \int_1^2 [F_1 \cdot \cos \alpha - F_2(x)] dx \\ &= [mg(z_2 - z_1) + m(c_2^2 - c_1^2)] \end{aligned}$$

- Trabajo Positivo (+).- Cuando el sistema lo hace sobre el ambiente.
- Trabajo Negativo (-).- Cuando el ambiente lo hace sobre el sistema.
- Sólo se puede realizar durante un proceso, y no pertenece a un determinado estado del sistema.
- Depende de la trayectoria y no es una diferencial exacta.
- Puede expresarse: $dW_m = -[dE_c + dE_p]$

1.6.6.2 TRABAJO DE VARIACION O DE CAMBIO DE VOLUMEN

Es el debido a las componentes perpendiculares de las fuerzas externas.

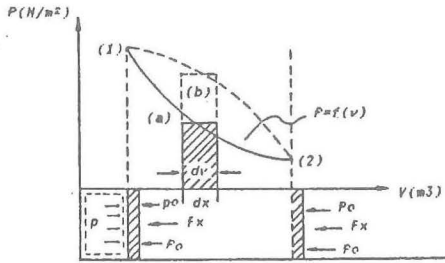


FIG. 1.25

$$dW_v = F \cdot dx; F = F_x + P_0 \cdot A$$

$$dW_v = (F_x + P_0 \cdot A) dx \cdot \frac{A}{A} = \left(\frac{F_x}{A} + P_0 \right) \cdot dv$$

$$\text{pero: } p = \frac{F_x}{A} + P_0$$

$$\therefore dW_v = p \cdot dv; W_{v1.2} = \int_1^2 p \cdot dv$$

1.6.6.4 TRABAJO DE FRICCIÓN

Es el debido a las componentes tangenciales de las fuerzas exteriores, que dan lugar a fuerzas de corrimiento o de fricción. Este trabajo se puede convertir totalmente en calor de fricción; se puede distinguir:

$$|W_{wm}| = |Q_{wm}| \quad \text{fricción entre superficies;}$$

$$|W_{wh}| = |Q_{wh}| \quad \text{fricción del portador de energía.}$$

$$\text{Luego: } |W_w| = |W_{wm}| + |W_{wh}| = |Q_{wm}| + |Q_{wh}| = |Q_w|$$

1.6.6.4 TRABAJO DE FLUJO O DE DESPLAZAMIENTO

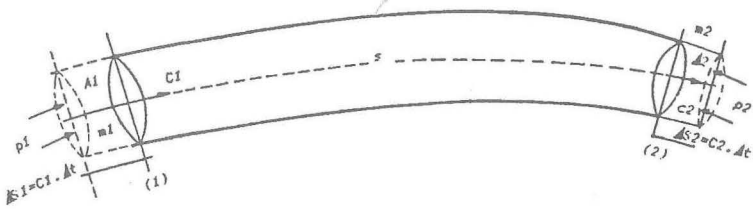


FIG. 1.26

$$W_{fl.2} = (P_2 \cdot A_2 \cdot \Delta S_2 - P_1 \cdot A_1 \cdot \Delta S_1) = (P_2 \cdot V_2 - P_1 \cdot V_1)$$

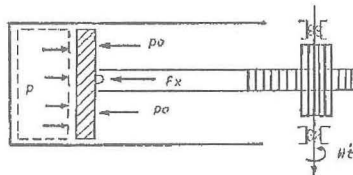
$$W_{fl.2} = \int_1^2 d(pv);$$

$$\text{ó} \quad \dagger dw_f = d(PV)$$

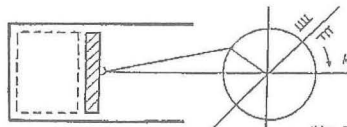
1.6.6.5 TRABAJO TECNICO.-

Es el que sale o entra al eje de una máquina rotativa o reciprocamente. Por definición es el que corresponde a :

$$\dagger dW_t = Fx \cdot dx = (Fx/A) \cdot dV$$



$$W_{t1.2} = \int_1^2 \left(\frac{Fx}{A} \right) dx$$



$$Ht = r \cdot H = Fd \cdot 2\pi n / 60$$

En las unidades de J/s, w_f pudiendo utilizarse la siguiente equivalencia: $1hp = 0.7457KW$

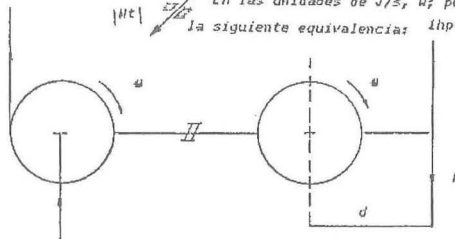


FIG 1.27

1.6.7 EL CALOR

Es el flujo de energía térmica debido a una diferencia de temperatura.

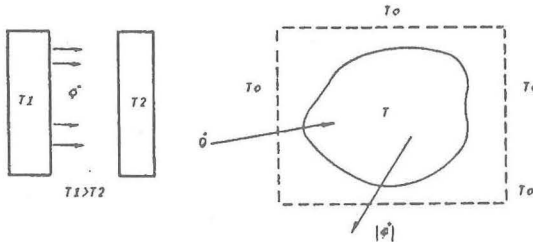


FIG 1.28

TEMPERATURA DEL CALOR: Es la temperatura a la cual el calor atraviesa la frontera del sistema considerado.

$Q = m \cdot q$ ó $\dot{Q} = \dot{m} \cdot q$, las unidades pueden ser: KJ, J, KJ/s, J/s, cal, Kcal, BTU, cal/s, KCAL/s, BTU/s; pudiendo utilizarse las siguientes equivalencias:

$$1 \text{ BTU (IT)} = 1.055056 \text{ KJ}$$

$$1 \text{ BTU} = 0.252 \text{ cal.}$$

$$1 \text{ cal} = 4.186 \text{ J} \quad \text{ó} \quad 1 \text{ Kcal} = 4.186 \text{ KJ.}$$

- Calor positivo (+) .- Cuando se suministra calor al sistema.
- Calor negativo (-) .- Cuando sale o se evacúa calor del sistema.
- Sólo se puede transferir durante un proceso y no pertenece a un determinado estado de sistema.
- Depende de la trayectoria y no es una diferencial exacta.
- No hay posibilidad de convertir energía térmica o calorífica totalmente en trabajo (2da. Ley).
- El calor se puede transferir por: *Conducción*, es decir, molécula a molécula; *Radiación*, es decir, a través de los llamados corpúsculos de energía; *Convección*, es decir, a través de un fluido o portador de energía líquido o gaseoso y en forma libre o forzada.

1.6.8 LA ENTALPIA

Por definición $H = U + P \cdot V$

$$\text{ó } h = u + p \cdot v$$

Es decir suma de energía interna y energía de flujo, las unidades pueden ser KJ, J.

$$H = m \cdot h$$

$$\text{ó } h = H/m ; \text{ KJ/Kgm.}$$

1.6.9 LA ENTROPIA

Es una magnitud de estado que depende del estado inicial y del estado final en un determinado proceso, es del tipo diferencial exacta:

$S = m \cdot s ; s = S/m ;$ se expresa en las unidades KJ/K; KJ/Kg-K.

Consideremos un plano (T-s):

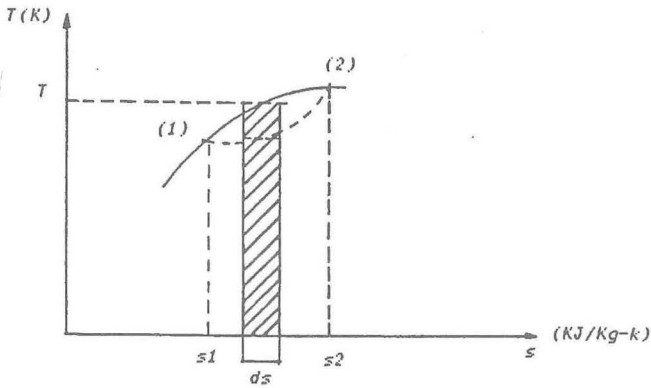


FIG 1.29

El área en este diagrama representa calor:

$$\int dq = T \cdot ds \rightarrow ds = dq/T \text{ KJ/Kg-K}$$

$$\int dQ = T \cdot dS \rightarrow dS = dQ/T \text{ KJ/Kg}$$

1.6.10 LAS FUNCIONES DE HELMHOLTZ Y DE GIBBS

$$A = U - T \cdot S \text{ ó } a = u - T \cdot s$$

$$G = H - T \cdot S \text{ ó } g = h - T \cdot s$$

$$A = m \cdot a \quad G = m \cdot g$$

$$a = A/m \quad g = G/m$$

1.6.11 EL CALOR ESPECIFICO

Es la cantidad de calor requerido para aumentar la temperatura de 1 Kgm de materia en 1° C.

Es decir:

$$c = \frac{1}{m} \cdot \frac{Q}{\Delta T} \dots\dots KJ/Kg\text{-}^{\circ}C$$

y la *capacidad calorífica*, se expresa como $C = m \cdot c$ en $KJ/^{\circ}C$

Como $c = f(t)$, se expresa como una serie:

$$c = a + b \cdot t^n + f \cdot t^m + \dots$$

a, b, f, n y m son constantes que se evalúan matemáticamente con la información experimental de cada substancia.

El calor específico instantáneo es

$$c = (1/m) \cdot (dQ/dT) \text{ y corresponde a una temperatura en particular.}$$

También podemos considerar un calor específico promedio:

$$C_{avg} = \frac{\int_1^2 dQ}{m(T_2 - T_1)} = \frac{m \int_1^2 (a + b t^n + f \cdot t^m) dt}{m(T_2 - T_1)}$$

En un diagrama Q vs T , podemos ver:

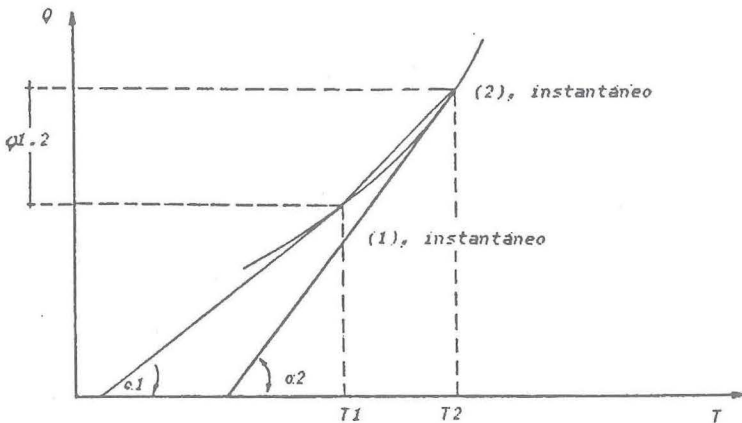


FIG 1.30

Como Q, depende del tipo de proceso se puede tener diversos calores específicos (c_x); c_p ó c_v ; a $p=\text{cte}$ ó a $v=\text{cte}$.

Los sólidos y líquidos tienen un cambio en su volumen muy pequeño durante su calentamiento, por eso es de mayor interés su C_p .

Los gases, en cambio varían grandemente su volumen, por eso es de mayor interés su C_v .

Resumiendo podemos decir que se puede considerar:

- Calores específicos constantes, calores específicos función de la temperatura y calores específicos promedio.

1.6.12 VARIACIONES DE LA ENERGIA INTERNA, DE LA ENTALPIA, DE LA ENTROPIA Y SUS RELACIONES CON SUS CALORES ESPECIFICOS PARA GASES IDEALES

ENERGIA INTERNA:

De $dU = (\delta u/dT)_v \cdot dT$;
 por definición $C_v = (\delta u/\delta T)_v$
 Luego: $dU = m \cdot C_v \cdot dT$ ó $du = C_v \cdot dT$

Para un proceso dado:

$$(U_2 - U_1) = \int_1^2 m \cdot C_v \cdot dT$$

$$(u_2 - u_1) = \int C_v \cdot dT$$

$$\therefore C_v = \frac{u_2 - u_1}{T_2 - T_1} \dots (\text{promedio})$$

ENTALPIA:

Si $h = f(T, P)$;
 $dh = (\delta h/\delta T)_p \cdot dT + (\delta h/\delta p)_T \cdot dp$

Pero como: $h = u + p \cdot v = u + R \cdot T$;

entonces $h = f(t)$, solamente; $p=\text{cte}$; $dp=0$

Luego: $dh = (\delta h/\delta T)_p \cdot \delta T$

Por definición: $c_p = (\delta h / \delta T)_p$

Por consiguiente:

$$dH = m \cdot c_p \cdot dT \quad \text{ó} \quad dh = c_p \cdot dT$$

Para un proceso dado:

$$(H_2 - H_1) = \int_1^2 m C_p \cdot dT$$

$$(h_2 - h_1) = \int_1^2 C_p \cdot dT$$

$$\therefore C_p = \frac{h_2 - h_1}{T_2 - T_1} \quad \dots \text{ (promedio)}$$

ENTROPIA:

De $h = u + p \cdot v$; $dh = du + p \cdot dv + v \cdot dp$

De la 1ª Ley: $\delta q = du + p \cdot dv$;

y como $\delta q = T \cdot ds$

Entonces:

$T \cdot ds = dh - v \cdot dp$; $ds = dh/T - (v/T) \cdot dp$;

Reemplazando: $ds = C_p \cdot (dT/T) - R \cdot (dp/P)$

Para un proceso dado:

$$(s_2 - s_1) = C_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

1.6.13 RELACIONES ENTRE c_p , c_v , R , \bar{R} Y K

De: $h = u + p \cdot v = u + R \cdot T$;

$dh = du + R \cdot dT$

Reemplazando: $C_p \cdot dT = C_v \cdot dT + R \cdot dT$

$$\therefore C_p - C_v = R$$

También: $\bar{C}_p - \bar{C}_v = \bar{R} \text{ KJ}/(\text{Kmol} \cdot \text{K})$

$$R \cdot M = \bar{R}$$

$$C_p/C_v = K ; \bar{C}_p/\bar{C}_v = K$$

Además: $P.V = m.R.T$; $P.V = n.\bar{R}.T$;

$$p.v = R.T$$

$$p.\bar{v} = \bar{R}.T$$

PROBLEMAS DE APLICACION

PROBLEMA N° 1.1

Diga Ud. si las energías: interna total, potencial total y cinética total son magnitudes de estado extensivas o intensivas y por qué?

Solución:

Las tres son magnitudes de estado extensivas, porque ellas dependen de la cantidad de materia.

Porque, por ejemplo, 5 Kgm de agua y 10 Kgm. no tienen la misma energía interna, ni la misma energía potencial, ni la misma energía cinética.

PROBLEMA N°1.2

Reconocer en cada uno de los sistemas mostrados a continuación, si es el trabajo o el calor el que cruza las fronteras del sistema. Considerar todos los casos.

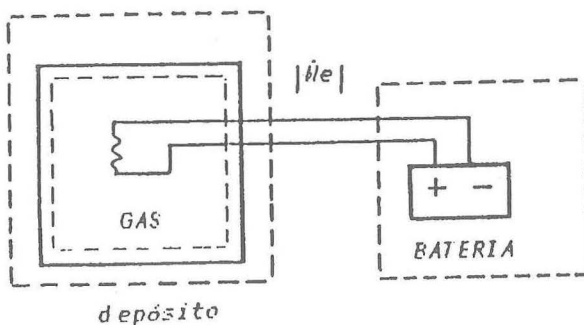


FIG 1.1

Solución:

Al sistema gas y al sistema depósito entra el trabajo, eléctrico que se convierte por medio de las resistencias en calor totalmente, $|\dot{W}_e| = |\dot{Q}_c|$

Del sistema batería sale trabajo eléctrico \dot{W}_e .

PROBLEMA N° 1.3

Una habitación es calentada con un radiador de vapor en un día de invierno. Examinar los diferentes sistemas con relación al calor transferido.

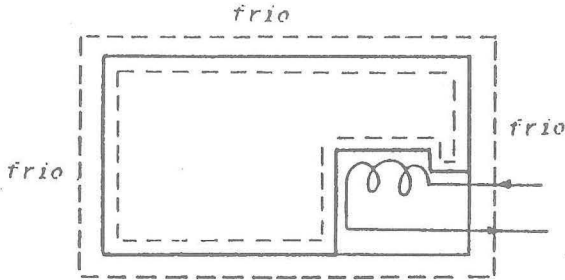


FIG 1.2

Solución:

- Para el sistema radiador, calor sale del radiador hacia habitación, $|Q|$
- Para el sistema habitación, ésta recibe calor, \dot{Q} .
- Para el sistema radiador y habitación, éste evacua calor al ambiente.

PROBLEMA N° 1.4

Un balón esférico tiene un diámetro de 20 cms. y contiene aire a una presión de 1.5 bar. El diámetro del balón se incrementa en 4cms. a causa de un calentamiento y por mantenerse las presiones proporcionales a sus diámetros.

Calcular el trabajo de cambio de volumen hecho por el aire para el proceso que se considera aproximadamente cuasiestático y reversible.

Solución:

De:

$$W_{v,1,2} = \int_1^2 P \cdot dV \dots (a)$$

Como:

$$P=C.x; \text{ y } v = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{x}{2}\right)^3 = \frac{\pi \cdot x^3}{6}; \text{ } dv = \frac{\pi}{2} \cdot x^2 \cdot dx$$

Reemplazando en α :

$$W_{v1.2} = \int_1^2 C \cdot x \left(\frac{\pi}{2} \cdot x^2 dx \right) = \frac{P_l}{x_1} \cdot \frac{\pi l}{2} \frac{X^4}{4} J^{v2}$$

$$W_{v1.2} = \frac{P_l}{x_1} * \frac{\pi}{8} (X_2^4 - X_1^4) =$$

$$\frac{3.1416 * 1.5 * 10^5}{8 * 0.20} (0.24^4 - 0.20^4)$$

$$\therefore W_{v1.2} = 505.92 J$$

PROBLEMA N° 1.5

El esquema técnico que se muestra, corresponde a la instalación para el acondicionamiento del aire en un laboratorio:

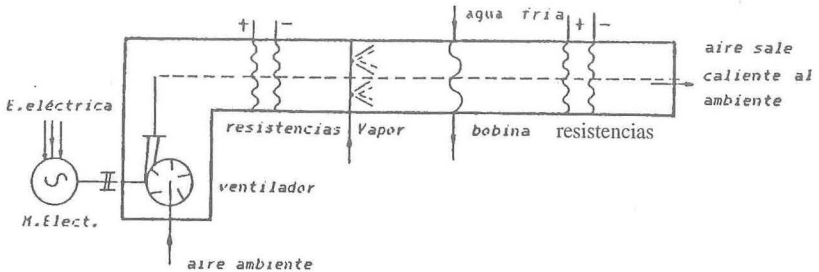


FIG 1.3

Cada uno de los sistemas son adiabáticos, lo mismo que la instalación total. Se pide:

- Citar o nombrar a los portadores de energía presentes en la instalación.
- Citar o nombrar a los distintos sistemas termodinámicos, clasificándolos completamente.
- Dibujar el diagrama de SANKEY de energía correspondiente a la instalación total.
- Identificar una de las definiciones de termodinámica, con alguno de los procesos que se da en la instalación o en la instalación total.
- Identificar una de las leyes de la termodinámica con alguno de los procesos que se da en la instalación o en la instalación total.

- f. Tome toda la instalación y señale según corresponda: superficie de control, fronteras, alrededores o ambiente.

Solución:

- a. Aire, agua, vapor de agua.
 b. Sistemas abiertos y adiabáticos: Motor eléctrico, ventilador, resistencias eléctricas, tubo para la pulverización del vapor, bobinas de enfriamiento, toda la instalación completa.
 Sistemas homogéneos: Aire, agua, vapor de agua.
 c.

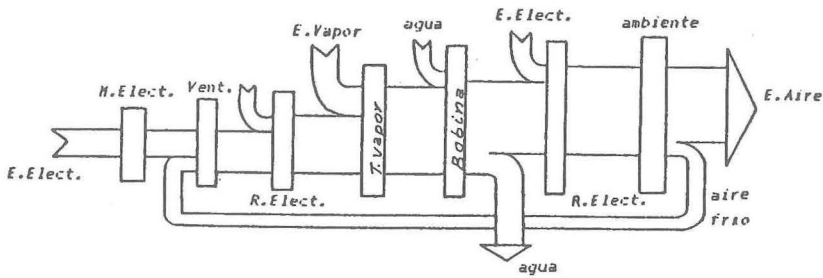


FIG 1.4

- d. Por ejemplo en el sistema ventilador: «Es la ciencia que se ocupa de las transformaciones y transferencias de la energía».
 e. Por ejemplo en el sistema ventilador: «1ª Ley; la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma».
 f.

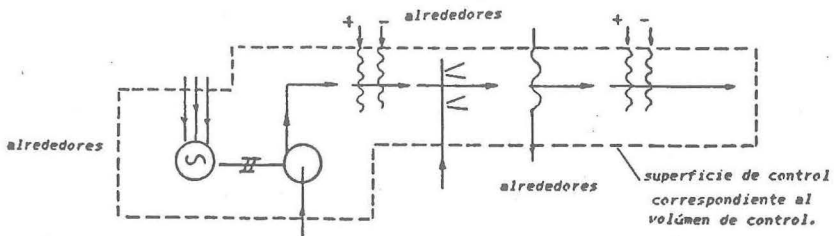


FIG 1.5

PROBLEMA N° 1.6

En el esquema técnico que se muestra a continuación, explique muy concretamente la verificación de la ley cero de la termodinámica.

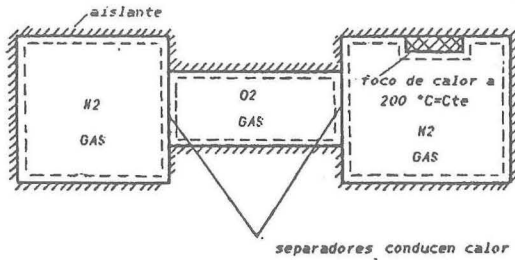


FIG 1.6

Solución:

Originalmente cada portador de energía tiene temperaturas diferentes cuando el foco está apagado.

Empecemos el análisis de derecha a izquierda:

Cuando el foco se prende, después de un tiempo los cuerpos: FOCO - N_2 (GAS) - PRIMER SEPARADOR, alcanzan la misma temperatura ($200\text{ }^\circ\text{C}$). La comunicación térmica es evidente.

Luego los cuerpos: FOCO-PRIMER SEPARADOR, O_2 (GAS), después de un tiempo, alcanzan la misma temperatura ($200\text{ }^\circ\text{C}$). La comunicación térmica es evidente.

Finalmente los cuerpos: FOCO - SEGUNDO SEPARADOR - H_2 (GAS), después de un tiempo, alcanzan la misma temperatura ($200\text{ }^\circ\text{C}$). La comunicación térmica es evidente.

Por consiguiente, la ley cero se ha cumplido a plenitud.

PROBLEMA N° 1.7

Considere que vapor de agua fluye por una tubería de 0.2 m de diámetro a la entrada (1) a razón de 0.5Kg/m^3 y en forma constante, tal como se indica en el esquema técnico que se da a continuación:

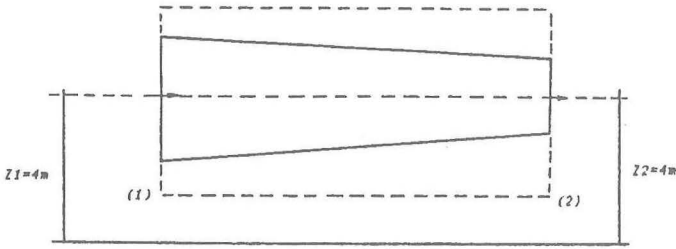


FIG 1.7

Si los volúmenes específicos del vapor de agua en (1) y en (2) son de $0.1049 \text{ m}^3/\text{Kgm}$, y $0.08002 \text{ m}^3/\text{Kgm}$, respectivamente; y la velocidad del vapor de agua es constante en (1) y en (2), se pide:

- Evaluar la energía cinética total, y la energía potencial total, en KW.
- Evaluar el diámetro de la tubería a la salida (2) en metros.

Solución:

$$\begin{aligned} \text{a) De: } c_1 &= \dot{m}_1 / (\rho_1 \cdot A_1) = \\ &= 0.5 / (9.533 \cdot 0.031416) = 1.67 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Entonces:

$$\begin{aligned} \dot{E}_c &= 1/2 \cdot \dot{m} \cdot c^2 = 1/2 \cdot 0.5 \cdot 1.67^2 \\ &= 0.697225 \text{ J/s} \end{aligned}$$

$$\dot{E}_c = 0.697225 \times 10^{-3} \text{ KW}$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_p &= \dot{m} \cdot g \cdot z = 0.5 \times 9.81 \times 4 \\ &= 19.62 \text{ J/s} \end{aligned}$$

$$\dot{E}_p = 19.62 \times 10^{-3} \text{ KW}$$

$$\begin{aligned} \text{b) De: } A_2 &= (\rho_1 / \rho_2) \cdot A_1 \\ &= (9.533 \cdot 0.031416) / 12.497 \\ &= 0.023965 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\therefore d_2 = \sqrt{4 \frac{A_2}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.023965}{3.1416}} = 0.17 \text{ m.}$$

$$d_2 = 0.17 \text{ m}$$

PROBLEMA N° 1.8

El esquema técnico que se muestra más abajo corresponde al aprovechamiento de la energía solar para el calentamiento del aire y del agua; con el trabajo técnico abtenido de las paletas se puede generar electricidad y hacer trabajar una pequeña bomba de agua:

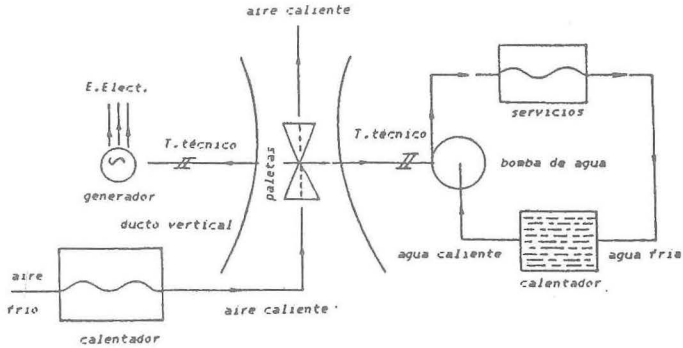


FIG 1.8

Para toda la instalación dibuje el diagrama de Sankey de energía.

Solución:

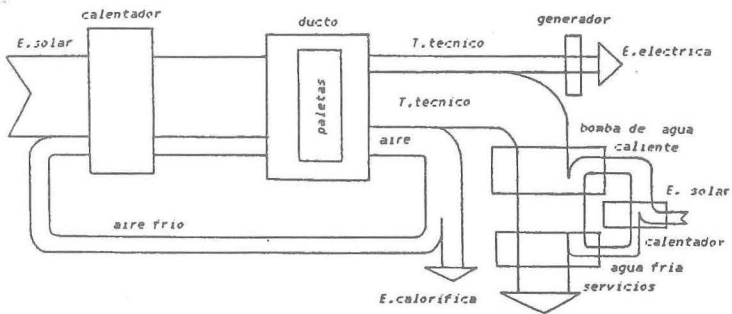


FIG 1.9

PROBLEMA N°1.9

La información técnica disponible para el vapor de agua que circula por una tubería es la siguiente:

ENTRADA(1): $p_1 = 40 \text{ bar}$; $t_1 = 650 \text{ }^\circ\text{C}$, $d_1 = 0.20 \text{ m}$; $v_1 = 0.1049 \text{ m}^3/\text{Kg}$;
 $u_1 = 3370.6 \text{ KJ/Kg}$
 $h_1 = 3790.15 \text{ KJ/Kg}$; $s_1 = 7.4943 \text{ KJ/Kg}\cdot\text{K}$

SALIDA (2): $P_2 = 40 \text{ bar}$; $t_2 = 450 \text{ }^\circ\text{C}$
 $m_1 = m_2 = 0.5 \text{ Kg/s}$; $c_1 = c_2 = \text{m/s}$;
 $v_2 = 0.08002 \text{ m}^3/\text{Kg}$; $u_2 = 3010.2 \text{ KJ/Kg}$.
 $h_2 = 3330.3 \text{ KJ/Kg}$; $s_2 = 6.9363 \text{ KJ/Kg}\cdot\text{K}$

Se pide evaluar:

- El trabajo de flujo total.
- La variación de la entalpía total.
- La variación de la energía interna total.
- La variación de la entropía total
- La variación de la función de Gibbs total.
- La variación de la función de HELMHOLTZ total.

Solución:

- $\dot{W}_{fl,2} = P_2 \dot{V}_2 - P_1 \dot{V}_1 = -49.760 \text{ KJ/s}$
- $\Delta \dot{H}_{1,2} = \dot{H}_2 - \dot{H}_1 = -229.925 \text{ KJ/S}$
- $\Delta \dot{U}_{1,2} = \dot{U}_2 - \dot{U}_1 = -180.20 \text{ KJ/S}$
- $\Delta \dot{S}_{1,2} = \dot{S}_2 - \dot{S}_1 = -0.279 \text{ KJ/s} \cdot \text{K}$
- $\Delta \dot{G}_{1,2} = \dot{H}_2 - T_2 \dot{S}_2 - \dot{H}_1 + T_1 \dot{S}_1 = 721.152 \text{ KJ/s}$
- $\Delta \dot{A}_{1,2} = \dot{U}_2 - T_2 \dot{S}_2 - \dot{U}_1 + T_1 \dot{S}_1 = 770.947 \text{ KJ/s}$

PROBLEMA N° 1.10

El portador de energía metano (CH_4) cuyo comportamiento es aproximadamente ideal, se comprime desde 1 bar y $15 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta 20 bares, utilizando la relación

$$T_2 / T_1 = (P_2 / P_1)^{\frac{k-1}{k}}$$

Se pide evaluar: c_p , c_v y K :

- Como función de la temperatura.
- Como valores medios.
- Como valores constantes.

Solución:

- De tablas para el metano se tiene:

$$C_p = 672.87 + 439.74\theta^{0.25} - 24.875\theta^{0.75} + 323.88\theta^{0.5}$$

Después de varios tanteos, asumimos

$$T_2 = 528 \text{ K.}$$

Luego,

$$\theta = 4.08y C_p = 41.3 \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol-K}}, c_v = 32.72 \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol-K}}$$

$$K = 1.2539$$

$$\text{verificando: } T_2 = 288(20)^{0.2025} =$$

$$= 528.26 \text{ K; aquí puede quedar o hacerse un ligero ajuste.}$$

Por lo que lo asumido se puede considerar correcto.

b) Con:

$$100d\theta = dT;$$

$$\theta_1 = 2.88; \theta_2 = 5.28$$

$$C_{pavg} = \frac{\int_1^2 C_p dt}{(t_2 - t_1)}$$

$$C_{pavg} = \frac{100[-672.87(5.28 - 2.88) + \frac{439.74}{1.25}$$

$$(5.28^{1.25} - 2.88^{1.25}) - \frac{24.875}{1.75}(5.28^{1.75} - 2.88^{1.75}) +$$

$$\frac{\frac{323.88}{0.5}(5.28^{0.5} - 2.88^{0.5})}{(528 - 288)}$$

$$\therefore C_{pavg} = 41.31 \text{ KJ/Kmol-K;}$$

$$C_{vavg} = 32.995 \text{ KJ/Kmol-K; } K = 1.2520$$

c) Tomando de tablas se obtiene:

$$c_p = 36.15 \text{ KJ/Kmol-K; } c_v = 27.84 \text{ KJ/mol-K;}$$

$$K = 1.299$$

PROBLEMA N° 1.11

Considere el agua como líquido ideal a las presiones de 20, 10, 5 y 1 bar a los cuales les corresponden las siguientes temperaturas y entalpías: 212.42 °C y 908.79 KJ/Kg; 179.91 °C y 762.81 KJ/Kg; 151.86 °C y 640.23 KJ/Kg; 99.63 °C y 417.46 KJ/Kg, respectivamente.

Con respecto a $t_o = 0$ °C, en donde:

$$h_o = 0 \text{ KJ/Kg}, \quad S_o = 0 \text{ KJ/Kg}; \text{ y}$$

$$p_o = 0.6113 \text{ KP}_a, \text{ evaluar:}$$

- Los calores específicos a presión constante en KJ/Kg- °C
- Las entropías específicas en KJ/Kg- °C

Solución:

a)De:

$$(h-h_o) = c_p(t-t_o) \quad \therefore \quad c_p = h/t;$$

reemplazando:

$$C_p = 908.79/212.42 = 4.2783 \text{ KJ/Kg- } ^\circ\text{C}$$

$$C_p = 762.81/179.91 = 4.2399 \text{ KJ/Kg- } ^\circ\text{C}$$

$$C_p = 640.23/151.86 = 4.2159 \text{ KJ/Kg- } ^\circ\text{C}$$

$$C_p = 417.46/99.63 = 4.1900 \text{ KJ/Kg- } ^\circ\text{C}$$

b)De: $(s-s_o) = c_p \ln(T/T_o) - R \ln(p/p_o)$; debido a que $R \cong 0$ KJ/Kg-k

$$\therefore s = c_p \ln(T/T_o); \text{ reemplazando:}$$

$$\therefore s = 4.2783 \ln(485.42/273) = 2.4623 \text{ KJ/Kg- } ^\circ\text{C}$$

$$s = 4.2399 \ln(452.91/273) = 2.1463 \text{ KJ/Kg- } ^\circ\text{C}$$

$$s = 4.2159 \ln(424.86/273) = 1.8646 \text{ KJ/Kg- } ^\circ\text{C}$$

$$s = 4.1900 \ln(372.63/273) = 1.3036 \text{ KJ/Kg- } ^\circ\text{C}$$

PROBLEMA N°1.12

Un pistón telescópico comprime aire en etapas sucesivas, tal como se indica en el esquema técnico siguiente:

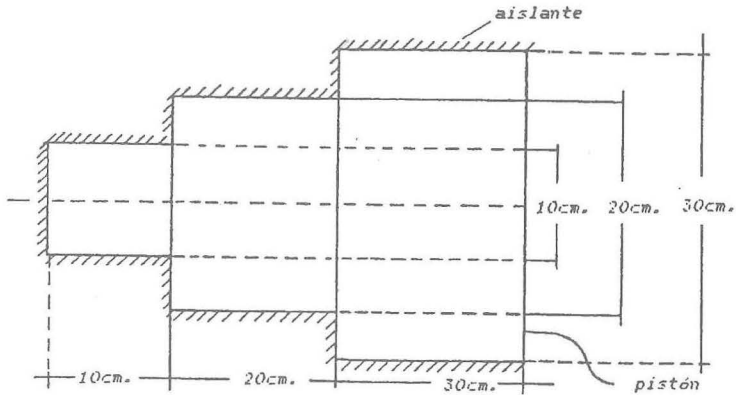


FIG. 1.10

Los pistones cilíndricos no conducen calor, la presión y temperaturas iniciales en la cámara de la derecha es de 1 bar y 20 °C , respectivamente.

Considere que cada proceso de compresión sigue la ley:

$$\frac{T_i}{T_f} = \left(\frac{P_i}{P_f} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$= \left(\frac{V_f}{V_i} \right)^{k-1}$$

donde i, inicio; f, final.

Se pide:

- Evaluar : p_f y T_f para la primera y segunda compresión, respectivamente.
- Graficar la curva: $P = f(v)$

Solución:

a) Con

$$P_f = \frac{P_i}{\left(\frac{V_f}{V_i} \right)^k} \text{ y } T_f = \frac{T_i}{\left(\frac{P_i}{P_f} \right)^{\frac{k-1}{k}}}$$

Reemplazando:

$$p_f = 1/(7.0686/28.2744)^{1.4} = 6.96 \text{ bar.}$$

$$T_f = 293/(1/6.96)^{0.2857} = 510.04 \text{ K.}$$

$$p_f = 1/(0.7854/28.2744)^{1.4} = 150.95 \text{ bar.}$$

$$T_f = 293/(1/150.95)^{0.2857} = 1228.46 \text{ K.}$$

b) Entonces:

Presiones: 1, 6.96, 150.95 bares.

Volúmenes: $28.2744 \cdot 10^{-3}$, $7.0686 \cdot 10^{-3}$,
 $0.7854 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$

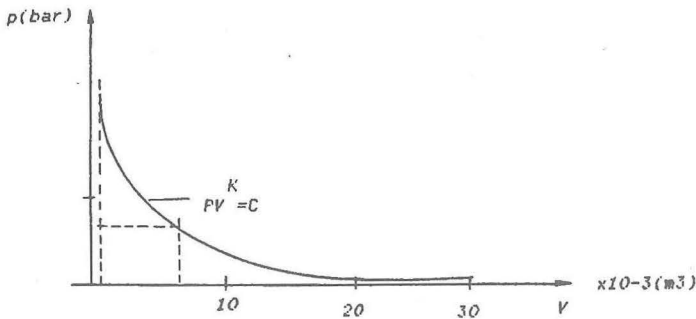


FIG 1.11

PROBLEMA N° 1.13

Considere el esquema técnico que muestra la figura siguiente:

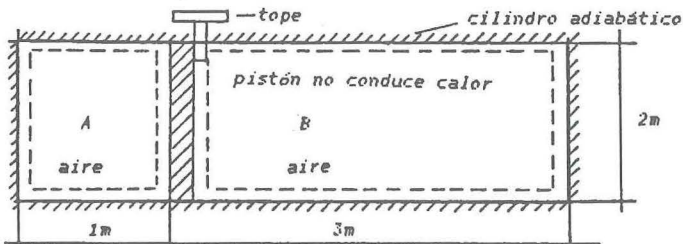


FIG 1.12

Las condiciones del aire en el lado A antes de sacar el tope y en el equilibrio son los siguientes (condiciones iniciales):

$m_A = 5 \text{ Kgm}$, $T_A = 873 \text{ K}$.
 y para el lado B, se tiene:
 $m_B = 12 \text{ Kgm}$, $T_B = 473 \text{ K}$.

Después de sacar el tope y en el equilibrio (condiciones finales), se tiene:

$P_{fA} = P_{fB}$, el trabajo de expansión de A es igual al trabajo de compresión de B, es decir, $W_A = -W_B$

Siendo: $W_A = m_A \cdot R_A \cdot (T_{fA} - T_A) / (1-K)$;
 $W_B = m_B \cdot R_B \cdot (T_{fB} - T_B) / (1-K)$

Además se sabe que las relaciones de temperaturas y de las presiones son:

$$\frac{T_A}{T_{fA}} = \left(\frac{P_A}{P_{fA}}\right)^{\frac{k-1}{k}}; \frac{T_B}{T_{fB}} = \left(\frac{P_B}{P_{fB}}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

Para el aire se puede considerar:

$R_A = R_B = 0.287 \text{ KJ/Kg-k}$; $k = 1.4$

Se pide calcular: T_{fA} ; T_{fB} ; P_{fA} ; P_{fB}

Solución:

De los trabajos se obtiene:

$$m_A(T_{fA} - T_A) + m_B(T_{fB} - T_B) = 0$$

y de las relaciones de las temperaturas con las presiones:

$$T_{fB} = \frac{T_B}{T_A} \cdot T_{fA} \cdot \left(\frac{P_A}{P_B}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

Reemplazando en la expresión anterior:

$$T_{fA} = \frac{m_B \cdot T_B + m_A \cdot T_A}{m_A + m_B \cdot \frac{T_B}{T_A} \cdot \left(\frac{P_A}{P_B}\right)^{\frac{k-1}{k}}}$$

y como: $P_A = 3.99 \text{ bar}$; $P_B = 1.73 \text{ bar}$, se obtiene: $T_{fA} = 757.81 \text{ K}$; $T_{fB} = 521.31 \text{ K}$; $P_{fA} = P_{fB} = 2.43 \text{ bares}$.

PROBLEMA N°1.14

En la figura que se muestra, calcule el trabajo técnico de la turbina si se tiene que:

$n = 3000 \text{ rev/min.}; F = 20 \text{ Kgf}; d = 20 \text{ cm.}$
 $75 \text{ (Kg-m)/s} = 1 \text{ hp} = 0.746 \text{ KW.}$

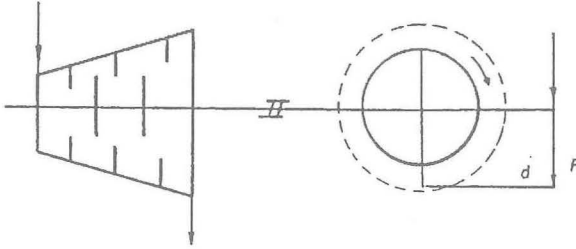


FIG 1.13

Solución:

$$\begin{aligned} \text{De: } \dot{W}_t &= T \cdot \omega = F \cdot d \cdot 2\pi n / 60 \\ &= 20 \cdot 0.20 \cdot 6.28 \cdot 3000 / 60 \\ &= 1256 \text{ Kg-m/s} \\ \dot{W}_t &= 1256 \cdot 0.746 / 75 = 12.493 \text{ KW} \end{aligned}$$

PROBLEMA N° 1.15

En la figura que se muestra, se desarrolla un proceso de expansión aproximadamente en forma cuasiestática. Establezca las condiciones para que el proceso sea reversible, graficándolo en los diagramas (P-V) y (P-Angulo de giro manivela).

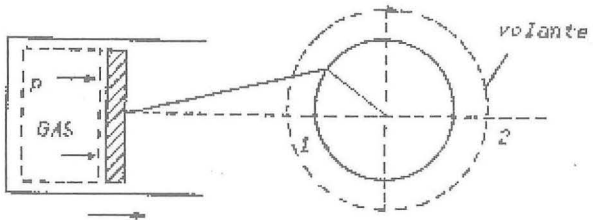


FIG 1.14

Solución:

CONDICIONES:

- No hay fricción, no hay disipación de calor y el proceso es aproximadamente cuasiestático.
- En la expansión, la volante acumula energía cinética, proceso(1-2).
- Esta energía cinética permite comprimir el gas sin intervención exterior, proceso(2-1).
- Los alrededores no han sido modificados.
- Los diagramas correspondientes serían:

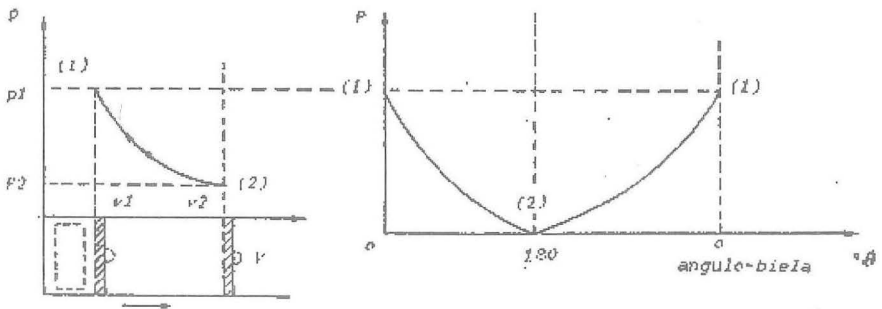


FIG 1.15

PROBLEMA 1.16

Según la figura que se muestra, calcule el trabajo mecánico realizado de (1) a (2) si se tiene que: $m=50\text{Kg}$; $c_1 = 2 \text{ m/s}$; $z_1 = 2\text{m}$; $c_2=0.5 \text{ m/s}$; $z_2=10\text{m}$; $g=9.81\text{m/s}^2$

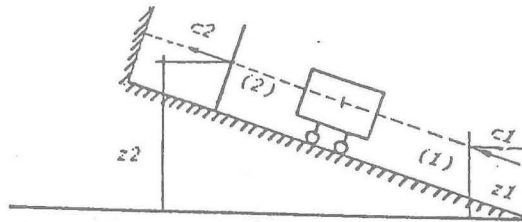


FIG 1.16

Solución:

De:

$$\dot{W}_{m1.2} = -(\dot{\Delta E}_c + \dot{\Delta E}_p) = -[1/2 * 50(0.5^2 - 2^2) + 50 * 9.81(10 - 2)]$$

$$\dot{W}_{m1.2} = -(-93.75 + 3924) = -3820.25 \text{ w.}$$

$$\therefore \dot{W}_{m1.2} = -3.83 \text{ KW}$$

PROBLEMA 1.17

En la figura que se muestra, calcule la velocidad en (1') para que el proceso sea reversible, si se tiene que :
 $m=50\text{Kgm}$, $z_1=z_2=50\text{m}$, $g=9.81 \text{ m/s}^2$.

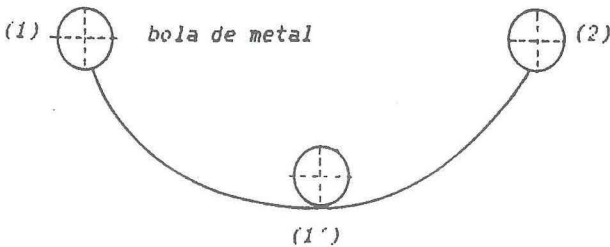


FIG 1.17

Solución:

Debe cumplirse que: $E_{p1(\text{max.})} = E_{c1'(\text{max})}$

Es decir: $m \cdot g \cdot z_1 = 1/2 \cdot m \cdot c_1^2$

$$C_1(\text{max}) = \sqrt{2gz} = \sqrt{2 * 9.81 * 50} = 31.32 \text{ m/s}$$

$$C_1 = 31.32 \text{ m/s}$$

PARTE II

2. LAS SUSTANCIAS PURAS, LOS DIAGRAMAS DE ESTADO Y LAS CARTAS GENERALIZADAS

SUSTANCIAS PURAS

Son aquellas que pueden existir en más de una fase, pero en todas ellas la composición química es homogénea e invariable. Ej: el agua (H_2O), el amoníaco (NH_3), el dicloro-difluor-metano (CF_2Cl_2), el mercurio (Hg), etc.

Tomando el agua (H_2O) tenemos según la definición: Sólido, Líquido, Vapor; Sólido-Líquido, Líquido-Vapor, Sólido-Vapor; Sólido-Líquido-Vapor.

Estas sustancias son muy utilizadas en los procesos cíclicos de las Centrales Térmicas Convencionales de Turbinas de Vapor, y en las plantas de refrigeración.

2.1 LA SUPERFICIE TERMODINAMICA

El comportamiento de una sustancia pura, se comprende estudiando la llamada superficie termodinámica que no viene a ser más que la representación de las magnitudes de estado p , v , y t , como una función:

$$P = f(v,t)$$

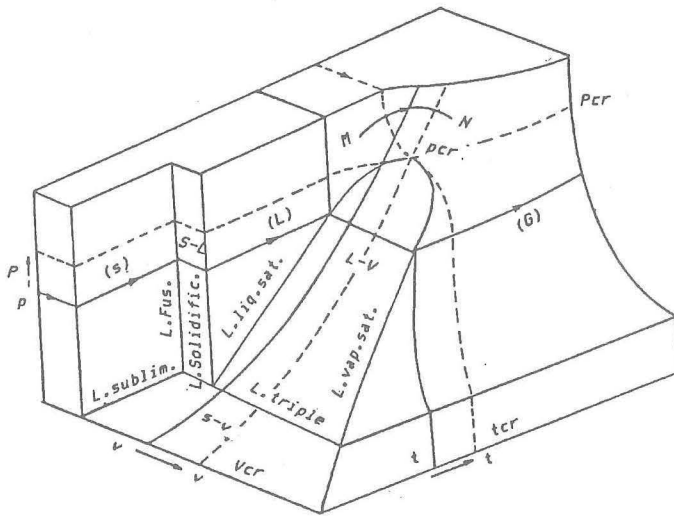


FIG. 2.1

Las coordenadas de un punto de la superficie representan los valores de la presión (p), el volumen específico (v), la temperatura (t) que debe tener la sustancia pura, para encontrarse en *equilibrio estable*.

Para el caso del agua, la zona de fusión ($s-L$), debe entrar a la izquierda, esto es así por el propio comportamiento del agua, cuando se congela aumenta su volumen y cuando se licúa disminuye su volumen. Para una sustancia pura cualquiera ocurre todo lo contrario.

2.2 DEFINICIONES IMPORTANTES

- ZONAS HOMOGENEAS.- Están en las fases de sólido, líquido o gas.
- ZONAS HETEROGENEAS.- Están como estados bifásicos de sólido-líquido, líquido-vapor y sólido-vapor.
- LIQUIDO SATURADO.- Cuando un líquido se encuentra en equilibrio con el vapor o con el sólido.
- LIQUIDO SUB-ENFRIADO O COMPRIMIDO.- Cuando el líquido tiene su temperatura inferior a la del líquido saturado y a la misma presión.
- VAPOR SATURADO.- Cuando un vapor se encuentra en equilibrio con el líquido o con el sólido, mas propiamente se llama *vapor húmedo* ($L-v$).
- VAPOR SOBRECALENTADO, SUPERCALENTADO, RECALENTADO O GAS.- Cuando el vapor tiene una temperatura superior a la del vapor saturado y a la misma presión.

- GRADOS DE RECALENTAMIENTO.- Es la diferencia entre la temperatura del vapor sobrecalentado y la temperatura del vapor saturado.
- SUBLIMACION.- El sólido cambia de fase pasando directamente a vapor. El calor necesario para este cambio se llama *calor latente de sublimación* y ocurre a presión y temperatura constantes (s-v).
- FUSION.- El sólido cambia de fase pasando a líquido. El calor necesario para este cambio se llama *calor latente de fusión* y ocurre a presión y temperatura constantes (s-L).
- EVAPORACION.- El líquido cambia de fase pasando a vapor. El calor necesario para este cambio se llama *calor latente de vaporización* y ocurre a presión y temperatura constantes (L-v).
- LINEA TRIPLE.- Existen las tres fases en equilibrio. Si la masa de una fase aumenta, la masa total de las otras dos disminuye en una misma cantidad, pero no se puede determinar la disminución que corresponde a cada fase.
- PUNTO CRITICO.- Es el punto en donde todas las propiedades de las fases líquida y de vapor se confunden o son iguales. A partir de él se pueden pasar directamente de la fase líquida a la fase de vapor (M-N).

2.3 LOS DIAGRAMAS DE ESTADO: (p-t), (t-v), (p-v), (t-s), (h-s) y (p-h)

Los primeros tres diagramas son las proyecciones de la superficie termodinámica de la sustancia pura en los planos (p-t), (t-v) y (p-v), respectivamente.

Al estudiar todas los diagramas, vamos a considerar como ejemplo, a la sustancia pura agua (H_2O), que es la de mayor utilización en nuestro caso.

2.3.1 DIAGRAMA DE ESTADO (p-t)

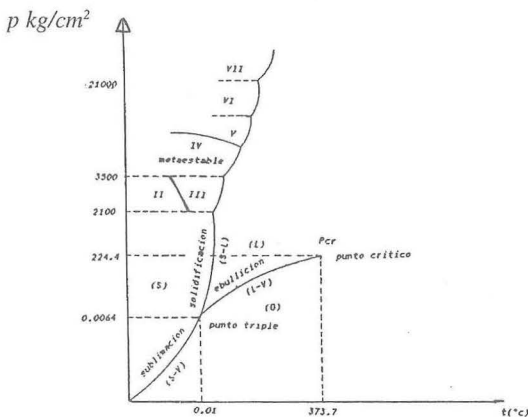


FIG. 2.2

En este plano o diagrama aparecen las zonas homogéneas de Sólido (s), Líquido (L) y Gas (G) en superficie, pero las zonas heterogéneas o bifásicas como simples líneas, la línea triple como un punto (llamado punto triple, el punto crítico; y las zonas homogéneas de todas las formas aleotrópicas o estados cristalinos del agua a altas presiones (propias del estado sólido). BRIDGEMAN, ha identificado siete (7) de estas formas cristalinas como puede verse en la figura.

Además, no debemos confundir el punto triple con el punto de fusión (ver figuras siguientes).

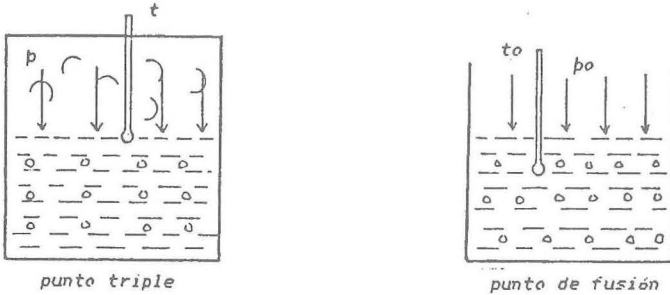


FIG. 2.3

PUNTO TRIPLE

La presión es ejercida por el vapor, totalmente:
 $p = 0.0064 \text{ Kg/cm}^2$; $t = 0.01 \text{ }^\circ\text{C}$.

PUNTO DE FUSION

La presión es ejercida por el aire, totalmente:
 $p_0 = 1.033 \text{ Kg/cm}^2$; $t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Finalmente, en este diagrama podemos ver claramente que la variación o tendencia de las presiones (p) y temperaturas (t), son perpendiculares a sus propios ejes.

2.3.2 DIAGRAMA DE ESTADO (t-v)

En este diagrama pueden verse las zonas de líquido, líquido-vapor y de gas. La tendencia de las temperaturas y de los volúmenes específicos son perpendiculares a sus propios ejes, mientras que la de las presiones tiene tres partes:

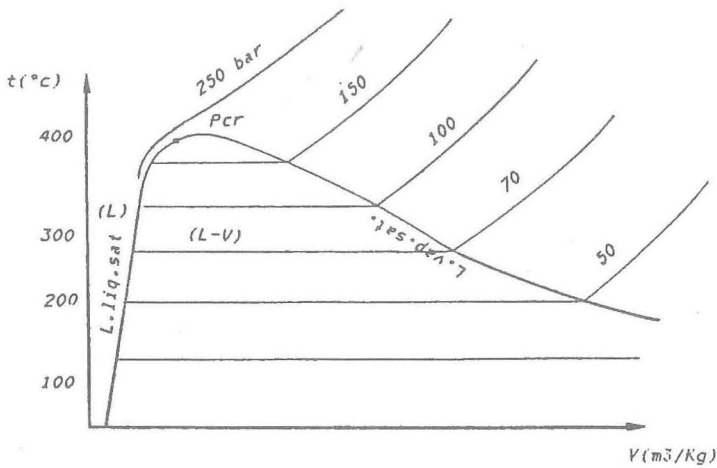


FIG. 2.4

la primera pegada a la línea de líquido saturado (sólo para valores muy elevados se aparta ligeramente de ella), la segunda parte coinciden con las isothermas en la zona de líquido-vapor y la tercera se torna exponencial en la zona de gas. El punto crítico, se distingue claramente. Este diagrama no es de mucha utilidad.

2.3.3 DIAGRAMA DE ESTADO (p-v)

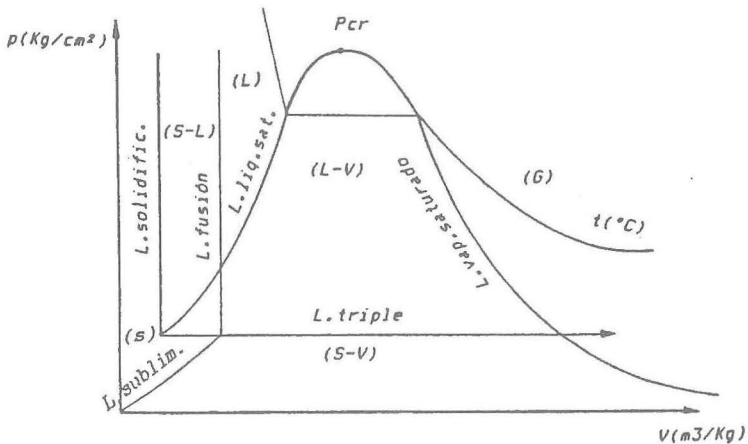


FIG. 2.5

En este diagrama sí aparecen completamente tanto las zonas homogéneas como heterogéneas, al igual que todas las líneas y curvas.

La tendencia de las presiones y de los volúmenes específicos son perpendiculares a sus propios ejes, mientras que las de las temperaturas tienen tres partes: la primera aparece con una ligera inclinación hacia la izquierda en la región de líquido comprimido, la segunda se confunde con la isóbara en la zona de mezcla líquido-vapor; y la tercera que es más o menos cóncava en la zona de gas.

Precisamente, este diagrama tiene una gran importancia, ya que nos permite completar algunos otros conceptos o definiciones muy utilizados en sustancias puras.

CALIDAD, TITULO O GRADO DE SEQUEDAD DE UN VAPOR HUMEDO.- La zona de mezcla líquido-vapor puede representarse lo que ocurre en una caldera de vapor:

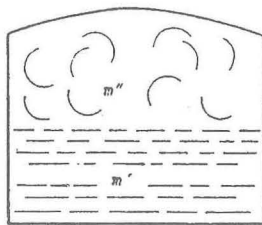


FIG. 2.6

Si x es la calidad, entonces:

$$x = \frac{m''}{m' + m''}$$

GRADO DE HUMEDAD O CONTENIDO DE VAPOR DE UN VAPOR HUMEDO.-

Si y es el grado de humedad, entonces:

$$y = \frac{m'}{m' + m''}$$

Entonces, siempre tendremos:

$$x + y = 1 \quad ; \quad x = 1 - y \quad ; \quad y = 1 - x$$

Considerando el diagrama (p-v) simplificado, siempre podemos obtener para la zona de mezcla líquido-vapor, las propiedades termodinámicas: v , u , h , s :

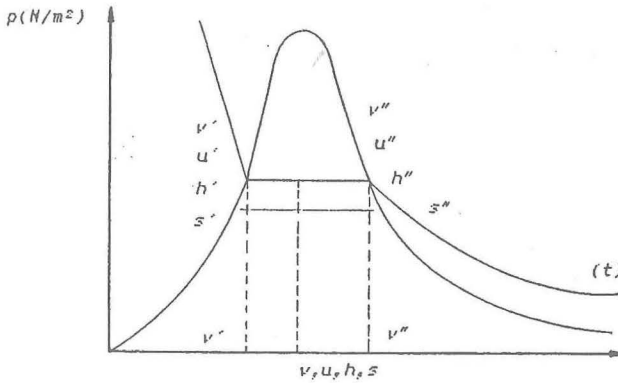


FIG. 2.7

$$\begin{aligned}
 \text{De } v &= \frac{V}{m} = \frac{(m'v' + m''v'')}{(m' + m'')} \\
 &= \left[\frac{m'}{(m' + m'')} \right] \cdot v' + \left[\frac{m''}{(m' + m'')} \right] \cdot v'' \\
 &= y \cdot v' + x \cdot v''
 \end{aligned}$$

Es decir: $v = v' + x(v'' - v')$; ó

$$v = v' - y(v'' - v')$$

∴ $x = \frac{(v - v')}{(v'' - v')}$; ó

$$y = \frac{(v'' - v)}{(v'' - v')}$$

Por similitud se puede obtener:

$$\begin{aligned}
 u &= u' + x(u'' - u'), \quad h = h' + x(h'' - h'), \\
 s &= s' + x(s'' - s') \\
 u &= u' - y(u'' - u'), \quad h = h' - y(h'' - h'), \\
 s &= s' - y(s'' - s')
 \end{aligned}$$

Asímismo, podemos demostrar que por un punto de una isóbara-isoterma de la región de mezcla para una línea de calidad constante x; es decir que de la figura (2.7) y de las relaciones anteriores se puede obtener:

$$\begin{aligned}
 a/b &= x/y = x/(1-x) = m''/m' = \\
 &= \frac{(v - v')}{(v'' - v')} = \frac{(h - h')}{(h'' - h')} = \\
 &= \frac{(s - s')}{(s'' - s')}
 \end{aligned}$$

Y, por eso en la zona de mezcla podemos trazar muchas líneas de calidad constante desde el valor mínimo que es (0) hasta su valor máximo que es (1). Si en algún cálculo se obtuviera x mayor que 1, significará que el vapor se encuentra como vapor recalentado.

2.3.4 DIAGRAMA DE ESTADO ($t-s$)

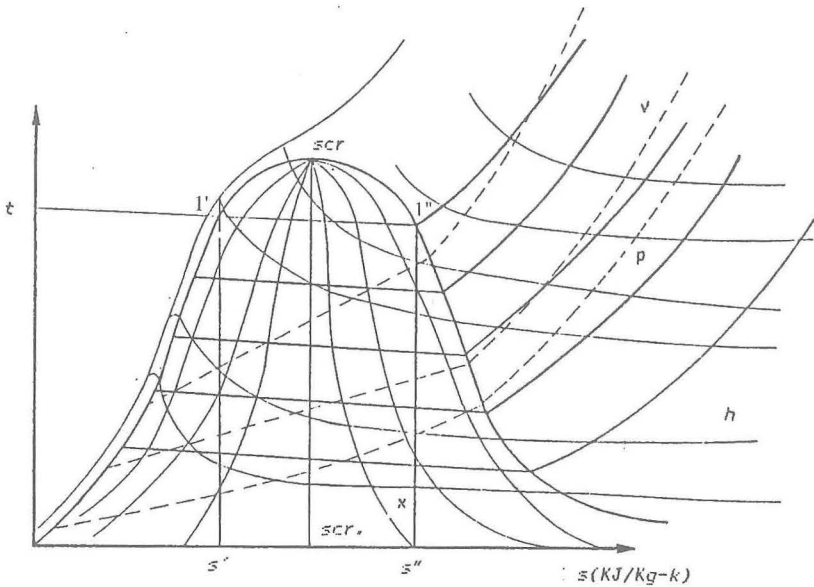


FIG. 2.8

En este diagrama, la tendencia de las isotermas y de las isentrópicas son perpendiculares a sus propios ejes.

Las isóbaras tienen tres partes: la primera está casi pegada a la línea de líquido saturado (sólo para valores muy altos se aparta ligeramente de ella), la segunda parte se confunde con la isoterma de la región de mezcla, y la tercera se torna exponencial en la zona de gas, con una inclinación al comienzo, pero que después ésta aumenta. Después esto se repite aproximadamente igual para cada isóbara.

Las isócoras también tiene tres partes: la primera parte está pegada a la línea de líquido saturado, la segunda va variando su inclinación en la región de mezcla líquido-vapor, y la tercera se torna exponencial en la región de gas con pendiente diferente a las isóbaras.

Las isentálpicas tienen también tres partes: la primera parte hasta ciertos valores de las presiones sube y luego baja en la zona de líquido comprimido, la segunda sigue bajando en la región de mezcla líquido-vapor, y la tercera tiende a ser horizontal aproximándose a las isotermas en la región de gas.

Finalmente las líneas de *calidad constante* van aumentando desde (0) hasta (1) partiendo todas del punto crítico.

Como en este diagrama el área representa calor, tendremos:

$$q = \int T ds$$

Podemos demostrar entonces que existe simetría entre la línea de líquido saturado y la línea de vapor saturado, respecto a una isentrópica que pasa por el punto crítico:

$$\int_{s'}^{s_{cr}} T ds = \int_{s_{cr}}^{s''} T ds$$

$$T(s_{cr} - s') = T(s'' - s_{cr})$$

$$2s_{cr} = s'' + s'$$

$$\therefore s_{cr} = (s'' + s')/2$$

2.3.5 DIAGRAMA DE ESTADO (*h-s*)

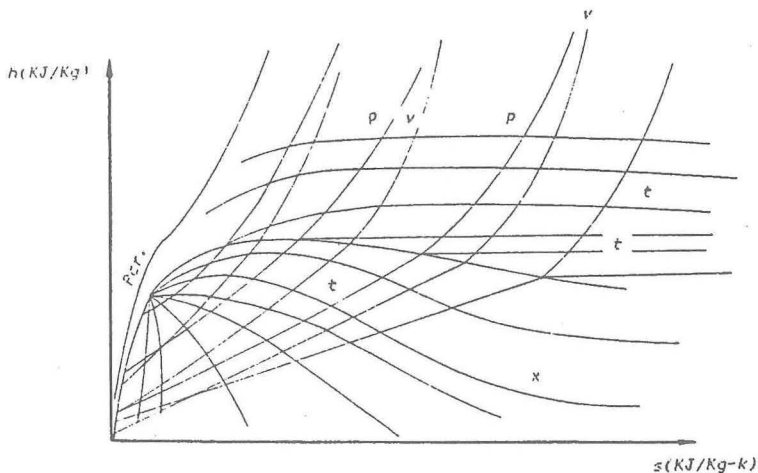


FIG. 2.9

En este diagrama, la tendencia de las entalpías y de las entropías, son perpendiculares a sus propios ejes.

Las isóbaras y las isocoras, tienen una tendencia similar como las del

diagrama (T-s), lo mismo que las líneas de calidad constante. En el caso de las *isotermas*, tienen tres partes: la primera se pega a la línea de líquido saturado, la segunda se confunde con la *isóbara* en la región de mezcla (con una pendiente que es la misma que la de la *isóbara*), y la tercera disminuye apreciablemente hasta casi ser horizontal, en la región de gas.

La pendiente de la *isóbara*, puede determinarse a partir de:

$$dh = Tds + vdp$$

$$(dh/ds)_p = T$$

su valor es la de la temperatura absoluta, que aumenta hasta volverse máxima en el punto crítico.

2.3.6 DIAGRAMA DE ESTADO (p-h)

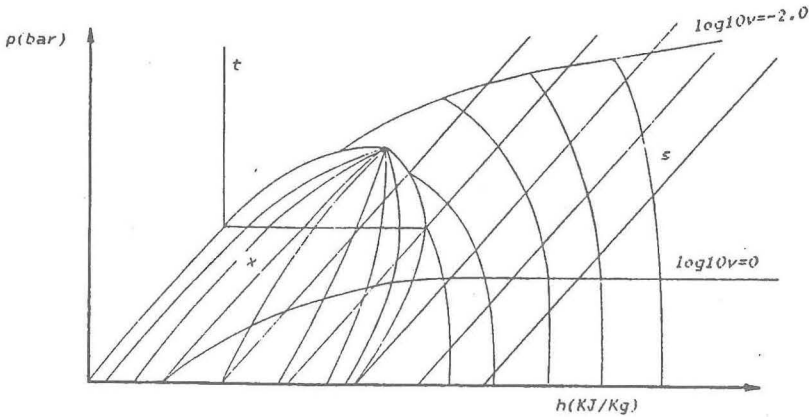


FIG. 2.10

La tendencia de las *isóbaras* y de las *isentalpicas*, son perpendiculares a sus propios ejes.

Las *isotermas*, tienen tres partes: la primera es vertical en la zona de líquido comprimido, la segunda se confunde con la *isóbara* en la zona de mezcla, y la tercera se vuelve concava ligeramente en la zona de gas.

Las *isócoras*, también tienen tres partes: la primera está pegada a la línea de líquido saturado, la segunda va subiendo en la zona de mezcla con pendiente variable, y la tercera tiende a ser horizontal ligeramente en la región de gas.

Las isentrópicas, tienen pendiente ligeramente variable y aparecen más marcadamente en parte de la región de mezcla y en toda la zona de gas.

Finalmente, las líneas de calidad constante son similares a la de los diagramas (t-s) y (h-s).

Podemos representar un proceso de calentamiento o de enfriamiento isobárico en los diagramas más usados: (p-v), (t-s), (h-s) y (p-h).

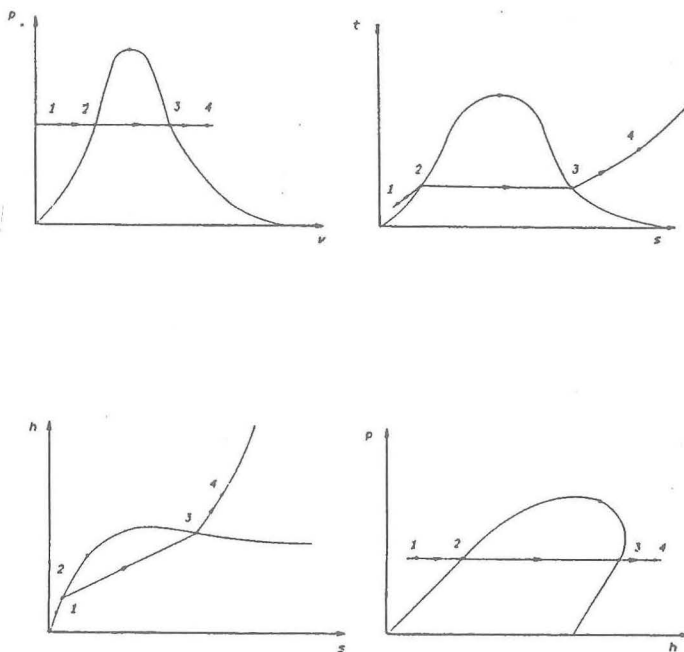


FIG. 2.11

2.4 LA REGLA DE LAS FASES DE GIBBS

Esta regla nos sirve para ver como influyen las variaciones de la presión, temperatura y composición sobre el número de fases, que pueden existir en equilibrio.

Es decir, si: N_f , es el número de fases presente, N_c , el número de componentes, y N_p , el número de propiedades intensivas (variance) que deben ser especificadas para fijar completamente el estado del sistema, tenemos:

$$N_f + N_p = N_c + 2$$

La cual en nuestro caso podemos aplicar a los estados de líquido comprimido, líquido-vapor, sólido-vapor, sólido-líquido, vapor recalentado y punto triple.

2.5 TABLAS DE PROPIEDADES TERMODINAMICAS

LIQUIDO COMPRIMIDO.- Aplicando la regla tendremos: $1 + N_p = 1 + 2$; $N_p = 2$, propiedades intensivas que generalmente son la presión y la temperatura.

VAPOR RECALENTADO.- Tendremos en este caso: $1 + N_p = 1 + 2$; $N_p = 2$, también son dos las propiedades intensivas que generalmente son la presión y la temperatura.

LIQUIDO-VAPOR, SOLIDO-VAPOR, SOLIDO-LIQUIDO.- Es decir: $2 + N_p = 1 + 2$; $N_p = 1$, propiedad intensiva que puede ser la presión, o la temperatura; pero además la composición de la mezcla, x por ejemplo para el vapor húmedo.

SOLIDO-LIQUIDO-VAPOR.- Es decir el punto triple: $3 + N_p = 1 + 2$, $N_p = 0$, no se necesita ninguna propiedad intensiva para fijar el estado del sistema.

En las tablas de propiedades termodinámicas, tanto para líquido comprimido como para vapor recalentado, al costado de la presión entre parentesis aparece un valor que corresponde a la temperatura de saturación a esa presión.

Por ejemplo un líquido comprimido a la presión de 5 MP_a (263.90) y 40°C de temperatura; en el diagrama (p-v), tendremos:

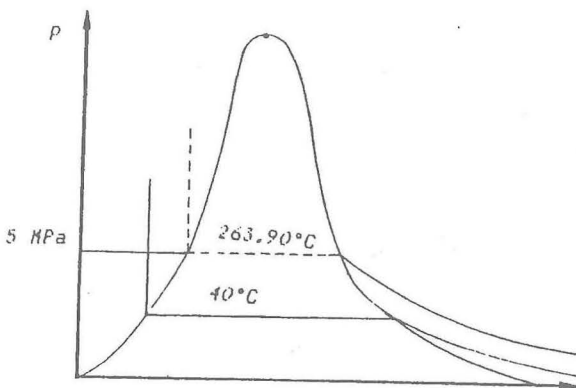


FIG. 2.12

Un vapor recalentado: 2.5 MP_a (223.99) y 400 °C, en el diagrama (p-v), tendremos:

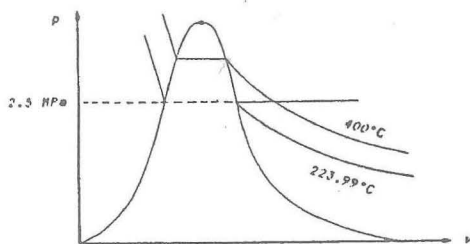


FIG. 2.13

Finalmente, debemos señalar que para los estados bifásicos, en las tablas debe hacerse una interpolación simple cuando el valor de la presión o de la temperatura no se encuentra en forma exacta.

Mientras que para los estados monofásicos, puede hacerse una interpolación simple o una interpolación doble, cuando los valores exactos de la presión y/o de la temperatura no se encuentran.

Si los rangos de las presiones o temperaturas caen fuera de los valores que están en las tablas, entonces es posible hacer una extrapolación.

2.6 LOS GASES Y VAPORES REALES E IDEALES

PARA GASES IDEALES, podemos utilizar la ecuación de estado: $p v = RT$, que vale cuando las densidades son bajas.

- Para altas densidades el comportamiento de éstos se desvía de los ideales.
- Entonces podemos introducir el concepto del factor de compresibilidad z y para los gases reales escribir:
 $Z = p v / RT$ ó $p v = Z.R.T.$
- Por lo que ahora podemos decir que cuando $Z = 1$, el gas o vapor es ideal.
- Y cuando Z se desvía de la unidad, significa que tenemos una medida del comportamiento de los gases reales.
- Por consiguiente, para cualquier portador de energía podemos graficar: $Z = f(P)$, con T y v constantes, tal como aparece en la figura siguiente:

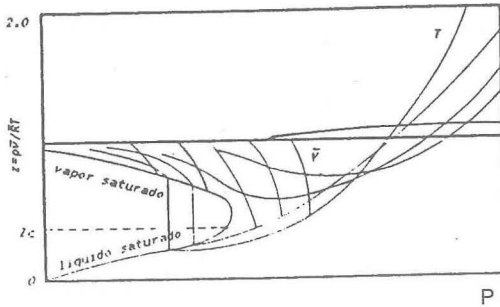


FIG. 2.14

Y como se puede observar que dependiendo de los valores de la presión y de la temperatura z puede tomar valores: $z = 1$, $z < 1$ ó $z > 1$; con los cuales podemos distinguir el comportamiento del portador de energía, si es ideal o real.

Podemos hacer un solo diagrama promedio para ser utilizado para cualquier portador de energía, utilizando el concepto de propiedades reducidas.

2.6.1 PROPIEDADES REDUCIDAS

Por definición: $p_r = p/p_c$, $T_r = T/T_c$,

$$v_r = v/v_c$$

sustituyendo p , T y v , en la ecuación

$$pv = Z.R.T$$

obtenemos $Z = f(P_r)$, con T_r y V_r constantes y el gráfico correspondiente se puede dibujar:

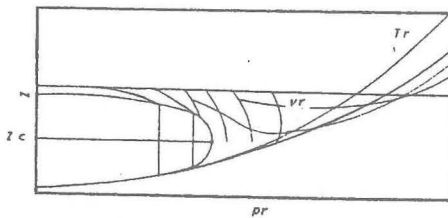


FIG. 2.15

Esta es la llamada carta generalizada de compresibilidad, en la cual se obtiene $Z_c = 0.27$, que es un valor que está comprendido entre 0.23 y 0.33 los cuales abarcan a una gran cantidad de portadores de energía.

Así mismo podemos señalar la aplicabilidad de las siguientes relaciones para la zona de mezcla:

$$Z = Z' + x(Z'' - Z')$$

$$pv' = Z' .R.T, pv'' = Z'' .R.T.$$

2.6.2 LEY DE LOS ESTADOS CORRESPONDIENTES

Podemos señalar que los gases y vapores a la misma presión y temperatura reducidos, son portadores en estados correspondientes.

Esto se generaliza entónces como una ley, la cual señala que:
«Todos los portadores de energía (FLUIDOS) en estados correspondientes, tienen el mismo volúmen reducido».

2.7 LA CARTA GENERALIZADA PARA CAMBIOS DE ENTALPIA A TEMPERATURA CONSTANTE

Consideremos que para una sustancia pura: $h = f(T,P)$

Entonces:

$$dh = (\partial h/\partial T)_p .dT + (\partial h/\partial P)_T .dp$$

$$(\partial h/\partial P)_T .dp = dh - (\partial h/\partial T)_p .dT$$

y sustituyendo $dh = Tds + vdp$

$$(\partial h/\partial P)_T .dp = Tds + vdp - (\partial h/\partial T)_p .dT$$

$$(\partial h/\partial P)_T = T.ds/dP + v - (\partial h/\partial T)_p .dT/dP$$

y como $dT = 0$; $(\partial h/\partial P)_T = Tds/dP + V$
y con MAXWELL; $(\partial v/\partial T)_p = -(\partial s/\partial P)_T$

$$(\partial h/\partial P)_T = v - T(\partial V/\partial T)_p; \text{ integrando}$$

$$(h_2 - h_1)_T = \int_1^2 [v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p] dp_T$$

Pero como: $v = Z.R.T/p$; y $T = T_c.T_r$,
 $p = p_c.p_r$

$$(\partial v/\partial T)_p = Z.R/P + (RT/P).(\partial Z/\partial T)_p$$

$$dT = T_c.dT_r, dp = P_c.dp_r$$

sustituyendo:

$$\left(\frac{\partial h}{\partial p} \right)_T = \frac{Z.R.T}{p} - T \left[\frac{Z.R.}{p} + \frac{RT}{p} \left(\frac{\partial z}{\partial T} \right)_p \right]$$

$$dh_i = -\frac{R \cdot T^2}{P} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_p \cdot dp_T$$

$$dh_T = -\frac{R \cdot T_c^2 T_r^2}{P_c \cdot Pr} \left(\frac{\partial Z}{T_c \cdot \partial T_r} \right)_{p_i} \cdot P_c \cdot (dP_r)_{Tr}$$

Integrando a temperatura reducida constante:

$$\frac{\Delta h_T}{T_c} = -\bar{R} \int_1^2 T_r^2 \cdot \left(\frac{\partial Z}{\partial T_r} \right)_{p_r} \cdot d \ln P_r$$

Si, h^* es la entalpia por Kmol a una temperatura dada y presión tan baja que $p_r \rightarrow 0$

h es la entalpia por Kmol a la misma temperatura y a una presión p_r .

$$\frac{\bar{h}^* - \bar{h}}{T} = \frac{Pr}{P_r} \int_{Pr=0}^{Pr} T_r^2 \left(\frac{\partial Z}{\partial T_r} \right)_{Pr} \cdot d \ln p_r$$

el término de la derecha se obtiene por integración gráfica a partir de la carta generalizada de compresibilidad.

Al graficar $(h^* - h)/T_c = f(Pr)$, con T_r constante se obtiene la figura siguiente:

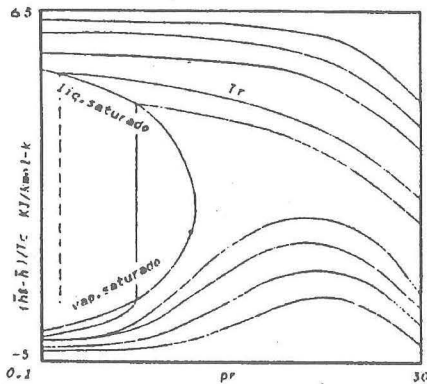


FIG. 2.16

2.8 LA CARTA GENERALIZADA PARA CAMBIOS DE ENTROPIA A TEMPERATURA CONSTANTE

Para la entropía también podemos considerar que $s = f(T, p)$, luego:

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_p \cdot dT + \left(\frac{\partial s}{\partial p}\right)_T \cdot dp$$

en la cual reemplazaremos las relaciones:

$$C_p = (\partial h / \partial T)_p = T(\partial s / \partial T)_p$$

$$(\partial v / \partial T)_p = -(\partial s / \partial p)_T$$

Es decir: $ds = C_p \cdot dT / T - (\partial v / \partial T)_p \cdot dp_T$;
y como $dT = 0$; $ds_T = -(\partial v / \partial T)_p \cdot dp_T$,
la cual se puede integrar cuando p aumenta de 0 a p .

$$(s_p - s_0^*) = - \int_0^p \left[\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p \cdot dp_T \right]$$

pero como $s_0^* \rightarrow \infty$, cuando $p \rightarrow 0$, la ecuación no es útil en esta forma.

Entonces, repetimos la integración exactamente igual, para un gas ideal:

$$(s_p^* - s_0^*)_T = - \int_0^p \left[\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p \cdot dp_T \right] = - \int_0^p \left[R \frac{\partial p_T}{p} \right]$$

Restando las dos expresiones:

$$(s_p^* - s_p)_T = - \int_0^p \left[\frac{R}{p} - \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p \right] dp_T$$

y con : $v = Z \cdot R \cdot T / p$; $T = T_c \cdot T_r$; $p = p_c \cdot p_r$;
se obtiene:

$$(s_p^* - s_p) = - \int_0^p \left[\frac{R}{p} - \frac{Z \cdot R}{p} - \frac{R \cdot T}{p} \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_p \right] dp_T$$

$$\therefore (\overline{s}_p^* - \overline{s}_p) = \overline{R} \int_0^p \left[(Z-1) \frac{dp_r}{p_r} + \overline{R} \cdot T_r \int_0^p \left(\frac{\partial Z}{\partial T_r}\right)_{p_r} \cdot \frac{dp_r}{p_r} \right]$$

Al graficar $(\overline{s}_p^* - \overline{s}_p) = f(p_r)$, con T_r constante obtenemos la figura siguiente:

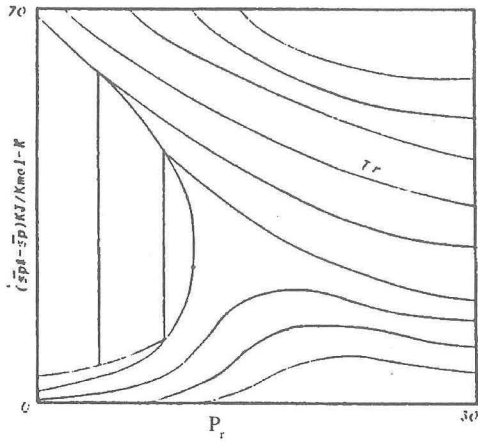


FIG. 2.17

INTERPRETACION PARA LA APLICACION DE GRAFICOS (2.16) Y (2.17)

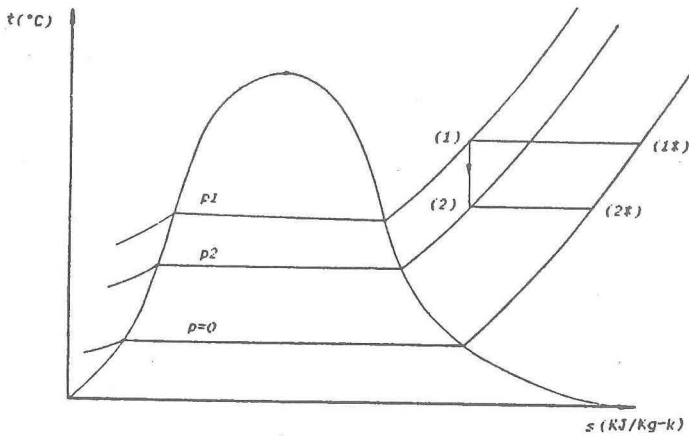


FIG. 2.18

Para una expansión de un gas real, podemos hallar el cambio de entalpía y de entropía mediante el siguiente artificio:

$$(\bar{h}_2 - \bar{h}_1) = -(\bar{h}_2^* - \bar{h}_2) + (\bar{h}_2^* - \bar{h}_1^*) + (\bar{h}_1^* - \bar{h}_1)$$

$$(\bar{s}_2 - \bar{s}_1) = -(\bar{s}_2^* - \bar{s}_2) + (\bar{s}_2^* - \bar{s}_1^*) + (\bar{s}_1^* - \bar{s}_1)$$

Donde:

$(\bar{h}_2^* - \bar{h}_2)$ y $(\bar{s}_2^* - \bar{s}_2)$, de cartas procesos isotérmicos.

$(\bar{h}_1^* - \bar{h}_1)$ y $(\bar{s}_1^* - \bar{s}_1)$, de cartas procesos isotérmicos.

$(\bar{h}_2^* - \bar{h}_1) = \bar{c}_p(T_2 - T_1)$, para gas ideal.

$(\bar{s}_2^* - \bar{s}_1) = \bar{c}_p \ln(T_2/T_1) - \bar{R} \ln(p_2/p_1)$, para gas ideal.

2.9 ECUACIONES DE ESTADO DE LOS GASES REALES

Se elaboran o desarrollan para determinados rangos de densidad específica o señalada por la propia ecuación de estado.

2.9.1 ECUACIONES GENERALIZADAS

A este grupo corresponde la ecuación semi-teórica desarrollada por VAN DER WALLS en 1873 y tiene sólo dos constantes:

$$(p + a/v^2)(v-b) = R.T$$

Donde: $a = [27/64] \cdot [(R^2 \cdot T_c^2)/p_c]$;

$$b = R \cdot T_c / 8P_c$$

b , corrige el volúmen ocupado por las moléculas.

a/v^2 , toma en cuenta las fuerzas de atracción intermoleculares.

Las constantes a y b , son evaluadas a partir del comportamiento general de los gases.

Una ecuación más exacta desarrollada por REDLICH y KWONG en 1949 es:

$$p = \frac{\bar{R} \cdot T}{\bar{v} - \bar{b}} - \frac{a}{\bar{v}(\bar{v} + \bar{b}) T^{\frac{1}{2}}}$$

Donde:

$$a = 0.42748 \bar{R}^2 \cdot T_c^{\frac{5}{2}}$$

$$b = 0.08664 \cdot \frac{\bar{R} \cdot T_c}{P_c}$$

Existen otras ecuaciones modificadas en años posteriores que pueden ser más exactas que los anteriores.

2.9.2 ECUACIONES EMPIRICAS

Para este grupo, podemos considerar como la más conocida la desarrollada por BEATTIE-BRIDGEMAN en 1928 y tiene cinco constantes las cuales son determinadas por procedimientos gráficos a partir de datos experimentales para cada sustancia.

Esta ecuación es completamente segura para densidades menores de 0.8 veces la densidad crítica.

Se escribe:

$$p = \frac{\bar{R} \cdot T (1 - \varepsilon)}{\bar{v}^2} (\bar{v} + B) - \frac{A}{\bar{v}^2}$$

Donde:

$$A = A_0 (1 - a/\bar{v})$$

$$B = B_0 (1 - b/\bar{v})$$

$$\varepsilon = C/\bar{v} \cdot T^3$$

Sin embargo, la forma más utilizada es la siguiente:

$$p = \frac{\bar{R} \cdot T}{\bar{v}} + \frac{\beta}{\bar{v}^2} + \frac{\gamma}{\bar{v}^3} + \frac{\delta}{\bar{v}^4}$$

Donde:

$$\beta = B_0 \cdot \bar{R} \cdot T - A_0 - C \cdot \bar{R}/T^2$$

$$\gamma = -B_0 \cdot b \cdot \bar{R} \cdot T + A_0 \cdot a - B_0 \cdot C \cdot \bar{R}/T^2$$

$$\delta = B_0 \cdot b \cdot c \cdot \bar{R}/T^2$$

Los valores de las cinco constantes se pueden hallar en tablas, de acuerdo al tipo o clase de portador de energía.

Las unidades de las magnitudes de estado son: p en KPa, v en m^3/Kmol , T en K, $R = 8.3143 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{mol}\cdot\text{K}$

Otra ecuación desarrollada por BENEDICT-WEBB-RUBIN en 1940 y para altas densidades, con ocho constantes, es más conveniente utilizarla.

En 1962, STROBRIDGE desarrolló una ecuación más exacta con dieciseis constantes.

2.9.3 ECUACIONES TEORICAS

Apoyándose en la termodinámica estadística o la teoría cinética de los gases se ha desarrollado la siguiente ecuación:

$$z = \frac{p \cdot \bar{v}}{\bar{R} \cdot T} = 1 + \frac{B(T)}{\bar{v}} + \frac{C(T)}{\bar{v}^2} + \frac{D(T)}{\bar{v}^3} + \dots$$

Donde: B(T), C(T), D(T), ..., son los coeficientes viriales y dependen de la temperatura.

Esta ecuación puede ser escrita utilizando el factor: $\frac{\bar{R} \cdot T}{p}$, que afectando a ambos miembros de la ecuación da:

$$\frac{\bar{R} \cdot T}{p} \cdot \bar{v} \alpha = -B(T) \cdot \frac{\bar{R} \cdot T}{p \cdot \bar{v}} - C(T) \cdot \frac{\bar{R} \cdot T}{p \cdot \bar{v}^2} - \dots$$

Con ayuda de las siguientes relaciones y tablas se pueden determinar los coeficientes viriales, por ejemplo para el segundo, B(T):

$$T^* = T/\epsilon/K \quad ; \quad B^* \cdot T^* = B(T)/b_0$$

TABLA 2.1

PORTADOR	$\epsilon/K;K$	$b_0(m^3/Kmol)$
x	-	-
y	-	-
z	-	-
.	.	.
.	.	.

TABLA 2.2

T*	B* . T*
-	-
-	-
-	-
-	-
.	.
.	.
.	.

Sin embargo esta ecuación también puede escribirse en términos del factor de compresibilidad z:

$$Z^3 - \left(\frac{Pr}{8Tr} + 1\right) Z^2 + \left(\frac{27Pr}{64Tr^2}\right) Z - \frac{27Pr^2}{512Tr^3} = 0$$

PROBLEMAS DE APLICACION

PROBLEMA 2.1

La información técnica disponible para el vapor de agua que circula por una tubería es la siguiente:

ENTRADA (1): $p_1 = 40 \text{ bar}$, $t_1 = 650 \text{ }^\circ\text{C}$,

$d_1 = 0.20 \text{ m}$.

SALIDA (2): $p_2 = 40 \text{ bar}$, $t_2 = 450 \text{ }^\circ\text{C}$,

$C_1 = C_2 = \text{m/s}$

$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = 0.5 \text{ Kgm/s}$.

Se pide evaluar:

- El trabajo de flujo total.
- La variación de la entalpía total.
- La variación de la energía interna total.
- La variación de la entropía total.
- La variación de la función de GIBBS total.
- La variación de la función de HELM-HOLTZ total.

Solución:

De tablas se puede obtener:

$v_1 = 0.1049 \text{ m}^3/\text{Kg}$; $v_2 = 0.08002 \text{ m}^3/\text{Kg}$.

$u_1 = 3370.6 \text{ KJ/Kg}$; $u_2 = 3010.2 \text{ KJ/Kg}$.

$h_1 = 3790.15 \text{ KJ/Kg}$; $h_2 = 3330.3 \text{ KJ/Kg}$.

$s_1 = 7.4943 \text{ KJ/Kg-K}$; $s_2 = 6.9363 \text{ KJ/Kg-K}$.

Luego:

a) $\dot{W}_{fl,2} = P_2 \dot{V}_2 - P_1 \dot{V}_1 = -49.760 \text{ KJ/s}$.

b) $\Delta \dot{H}_{1,2} = \dot{H}_2 - \dot{H}_1 = -229.925 \text{ KJ/s}$.

c) $\Delta \dot{U}_{1,2} = \dot{U}_2 - \dot{U}_1 = -180.2 \text{ KJ/s}$.

d) $\Delta \dot{S}_{1,2} = \dot{S}_2 - \dot{S}_1 = -0.279 \text{ KJ/K-s}$.

$$e) \Delta \dot{G}_{1,2} = \dot{H}_2 - T_2 \cdot \dot{S}_2 - \dot{H}_1 + T_1 \cdot \dot{S}_1 = 721.152 \text{ KJ/s.}$$

$$f) \Delta \dot{A}_{1,2} = \dot{U}_2 - T_2 \cdot \dot{S}_2 - \dot{U}_1 + T_1 \cdot \dot{S}_1 = 770.947 \text{ KJ/s.}$$

PROBLEMA 2.2

- Para la isentálpica o entalpía que se mantiene constante con un valor de 1000 KJ/Kg en la región de mezcla del portador de energía agua, evaluar la calidad x para las presiones de : 20, 10, 5 y 1 bar.
- Para la isócara o línea de volúmen específico constante igual a 0.1 m³/Kg, evaluar la calidad x para las presiones de: 20, 10, 5 y 1 bar.
- Con los valores tomados de tablas y para las presiones de 20, 10, 5, y 1 bar; evaluar los calores específicos a presión constante correspondientes a líquido saturado (ideal).
- Con los valores C_p hallados en c) y para las presiones de 20, 10, 5 y 1 bar, evaluar el valor de la entropía correspondiente a líquido saturado (ideal), utilizando:

$$s = C_p \ln(T/T_0), \text{ donde } t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Solución

- a) Con la relación $x = (h''-h')/(h''-h')$, se obtiene:

$$X = \frac{1000 - 908.79}{2799.5 - 908.79} = 0.0482$$

$$X = \frac{1000 - 762.81}{2778.1 - 762.81} = 0.1177$$

$$X = \frac{1000 - 640.23}{2748,7 - 640.23} = 0.1706$$

$$X = \frac{1000 - 417.46}{2675.5 - 417.46} = 0.2580$$

- b) Con la relación $x = (v-v')/(v''-v')$, se obtiene:

$$X = \frac{0.1 - 0.001177}{0.09963 - 0.001177} = 1.0037$$

(casi recalentado)

$$X = \frac{0.1 - 0.001127}{0.19444 - 0.001127} = 0.5115$$

$$X = \frac{0.1 - 0.001093}{0.3749 - 0.001093} = 0.2646$$

$$X = \frac{0.1 - 0.001043}{1.6940 - 0.001043} = 0.0585$$

c) Con la relación $C_p = (h - h_0)/(t - t_0)$; $h_0 = 0$; $t_0 = 0$, se obtiene: $C_p = h'/t$

$$C_p = 908.79/212.42 = 4.2783 \text{ KJ/Kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$C_p = 762.81/179.91 = 4.2399 \text{ KJ/Kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$C_p = 640.23/151.86 = 4.2159 \text{ KJ/Kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$C_p = 417.46/99.63 = 4.1900 \text{ KJ/Kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

d) Con la relación $s = c_p \ln T/T_0$, se obtiene:

$$s' = 4.2783 \ln 485.42/273 = 2.4623 \text{ KJ/Kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$s' = 4.2399 \ln 452.91/273 = 2.1463 \text{ KJ/Kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$s' = 4.2159 \ln 424.86/273 = 1.8646 \text{ KJ/Kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$s' = 4.1900 \ln 372.63/273 = 1.3036 \text{ KJ/Kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

PROBLEMA 2.3

Utilizando carta generalizada, evaluar $\Delta \bar{h}$ y $\Delta \bar{s}$ para el portador de energía butano (C_4H_{10}) que se comporta como gas ideal y que se expande desde 190 bar y 1275.6K, hasta 19 bar y 850.4K.

Solución

La expansión puede graficarse en el diagrama (T-s).

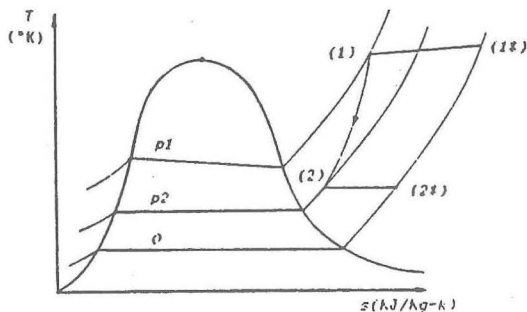


FIG. 2.1

Con:

$$(h_2 - h_1) = -(h_2^* - h_2) + (h_2^* - h_1^*) + (h_1^* - h_1)$$

$$(s_2 - s_1) = -(s_2^* - s_2) + (s_2^* - s_1^*) + (s_1^* - s_1)$$

Con: $T_{r1} = 3$ y $P_{r1} = 5$ y de cartas generalizadas se obtiene:

$$\bar{h}_2^* - \bar{h}_2 = 0.83 * 452.5 = 352.916 \text{ KJ/KMOL};$$

$$\bar{s}_2^* - \bar{s}_2 = 0.40 \text{ KJ/KMOL} - K$$

De igual modo con $T_{r2} = 2$ y $P_{r2} = 0.5$, se obtiene:

$$\bar{h}_1^* - \bar{h}_1 = 2.50 * 452.5 = 1063 \text{ KJ/KMOL};$$

$$\bar{s}_2 - \bar{s}_1 = 0.75 \text{ KJ/KMOL} - K$$

y para:

$$\bar{h}_2^* - \bar{h}_1^* = \bar{c}_p (T_2 - T_1) = 1.7164 * 58.124 (850.4 - 1275.6)$$

$$\therefore \bar{h}_2^* - \bar{h}_1^* = -42419.667 \text{ KJ/KMOL}$$

$$\bar{s}_2^* - \bar{s}_1^* = \bar{c}_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

$$= 1.7164 * 58.124 \ln \frac{850.4}{1275.6} -$$

$$0.14304 * 58.124 \ln \frac{19}{190} =$$

$$\therefore \bar{s}_2^* - \bar{s}_1^* = -21.3070 \text{ KJ/KMOL-K}$$

Reemplazando:

$$\bar{h}_2 - \bar{h}_1 = -352.916 - 42419.667 + 1063$$

$$= -41708.916 \text{ KJ/KMOL}$$

$$\bar{s}_2^* - \bar{s}_1^* = -0.40 - 21.3071 + 0.75 = -20.957 \text{ KJ/KMOL} - K$$

PROBLEMA 2.4

Un depósito cilíndrico de 0.50m. de altura y 0.30m. de diámetro contiene butano (C_4H_{10}), el cual en su 1/5 parte se halla como líquido y en sus 4/5 partes se halla como vapor. Se pide evaluar la calidad del butano y el volumen específico de la mezcla, si al interior del depósito la temperatura reinante es de 45.9°C.

Solución:

En el depósito cilíndrico hay vapor húmedo de butano:

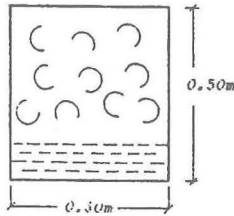


FIG. 2.2

De: $x = m''/(m'+m'')$

y con:

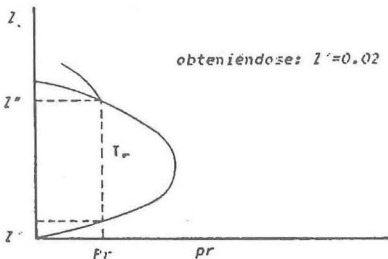
$m' = PV/(5*Z'*RT)$; $m'' = PV*4/(5*Z''*RT)$

podemos evaluar la calidad x.

Con $t_r = 318.9/452.2 = 0.75$; $P_r = 0.11$ (de carta)

$\therefore P = 4.18$ bar.

El volumen es : $V = 3.1416*(0.30)^2/4*0.50$
 $= 0.035343m^3$



obteniéndose: $Z' = 0.02$ $Z'' = 0.89$

OBTENIÉNDOSE:

$Z' = 0.02$

$Z'' = 0.89$

FIG. 2.3

Reemplazando valores:

$$m' = \frac{4.18 * 10^5 * 0.035343}{5 * 0.02 * 143.07 * 318.9} = 3.24 \text{ kgm}$$

$$m'' = \frac{4.18 * 10^5 * 0.035343 * 4}{5 * 0.89 * 143.07 * 318.9} = 2.91 \text{ kgm}$$

Entonces:

$$x = 2.91 / (3.24 + 2.91) = 0.4732$$

y con : $m \cdot v = V$

$$\begin{aligned} v &= V/m \\ &= 0.035343 / 6.15 \\ &= 0.005747 \text{ m}^3/\text{Kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{o con: } v &= v' + x(v'' - v') \\ &= 0.005747 \text{ m}^3/\text{Kg} \end{aligned}$$

$$\text{o con: } pv = Z \cdot R \cdot T \text{ y } Z = Z' + x(Z'' - Z')$$

$$\text{Es decir: } v = Z \cdot R \cdot T / p = 0.005747 \text{ m}^3/\text{Kg}$$

PROBLEMA 2.5

Considere el proceso (1-2) para el calentamiento del vapor de agua húmedo, tal como se indica en los esquemas técnicos de más abajo:

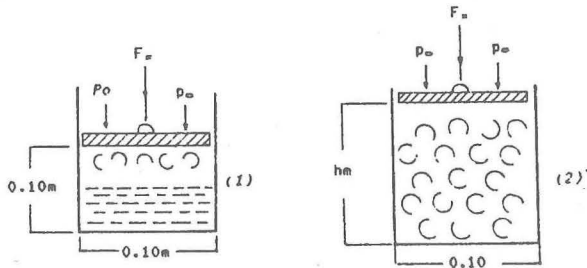


FIG.2.4

la información técnica adicional, es la siguiente:

$$\begin{aligned} P_1 &= 10 \text{ bar, } x_1 = 0.6; P_2 = 10 \text{ bar,} \\ t_2 &= 370 \text{ }^\circ\text{C, } P_0 = 1 \text{ bar.} \end{aligned}$$

Se pide:

- a) Evaluar la fuerza F_x en N, y la altura hasta donde se elevó el pistón en metros, respecto a la base del cilindro.
b) La masa del líquido, y del vapor en el estado (1).

Solución:

a) En el equilibrio:

$$P = P_o + F_x/Ap$$
$$Ap = \pi * 0.1^2/4$$
$$= 0.007854 \text{ m}^2$$

Reemplazando: $10 * 10^5 = 1 * 10^5 + F_x/0.007854$

$$\therefore F_x = 7068.6 \text{ N}$$

Además: $V_2 = m_2 * v_2 = \pi * 0.10^2/4 * h$

y como; $v_1 = \pi * 0.10^2/4 * 0.10 = 0.0007854 \text{ m}^3$

$$v_1 = 0.001127 + 0.6(0.19444 - 0.001127)$$

$$v_1 = 0.1171148 \text{ m}^3/\text{Kg}$$

Entonces:

$$m_1 = V_1/v_1$$
$$= 0.0007854/0.1171148$$
$$= 6.7062 * 10^{-3} \text{ Kgm} = m_2$$

y de tablas: $v_2 = 0.29214 \text{ m}^3/\text{Kgm}$

es decir que:

$$V_2 = 6.7062 * 10^{-3} * 0.29214$$
$$= 0.001959 \text{ m}^3$$

Por consiguiente: $0.001959 = \pi * 0.10^2/4 * h$

$$\therefore h = 0.25 \text{ m.}$$

b) De: $m' = y * m$; $y m'' = x * m$

se obtiene:

$$m' = 2.68248 * 10^{-3} \text{ Kgm}; y$$

$$m'' = 4.02372 * 10^{-3} \text{ Kgm.}$$

PROBLEMA 2.6

En un depósito rígido cuyas dimensiones son de: $0.20 * 0.40 * 0.20 \text{ m}^3$, originalmente se halla una mezcla líquido-vapor de agua con una calidad de 0.5 y un volumen específico de la mezcla igual a $0.1 \text{ m}^3/\text{Kg}$.

Luego mediante un calentamiento se logra que la calidad del vapor húmedo sea de 0.9. Se pide:

- Graficar el proceso en los diagramas (p-v) y (T-s) de sustancia pura.
- Evaluar la presión en bares, antes y después del calentamiento.
- Evaluar la cantidad de líquido que se evaporó, en Kgm.

Solución:

a) Se puede plantear que:

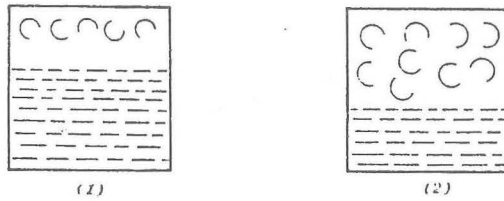


FIG. 2.5

En el diagrama (p-v) y (T-s) el proceso será a volumen constante:

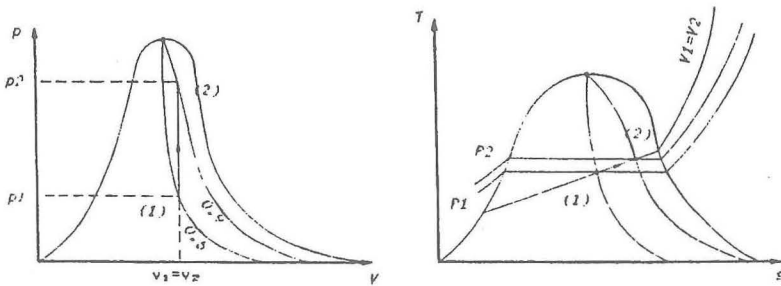


FIG. 2.6

b) Para los estados (1) y (2):

$$v_1 = v_1' + x_1(v_1'' - v_1')$$

$$v_2 = v_2' + x_2(v_2'' - v_2')$$

$$0.1 = 0.001127 + 0.5(0.19444 - 0.001127) \rightarrow 10 \text{ bares}$$

$$0.1 \neq 0.0977835$$

$$0.1 = 0.001121 + 0.5(0.2150 - 0.00121) \rightarrow 9 \text{ bares.}$$

$$0.1 \neq 0.1080605$$

Interpolando: $p_1 = 9.78$ bares.

$$0.1 = 0.001177 + 0.9(0.09963 - 0.001177) \rightarrow 20 \text{ bares.}$$

$$0.1 \neq 0.0897847$$

$$0.1 = 0.001166 + 0.9(0.11349 - 0.001166) \rightarrow 17.5 \text{ bares.}$$

Interpolando: $p_2 = 17.95$ bares.

c) De: $mv = V$

$$\therefore m = 0.20 \cdot 0.40 \cdot 0.20 / 0.1 = 0.16 \text{ Kgm.}$$

De: $x = m'' / m$

$$m_1'' = 0.5 \cdot 0.16 = 0.08 \text{ Kgm.}$$

$$m_2'' = 0.9 \cdot 0.16 = 0.144 \text{ Kgm.}$$

Entonces:

$$m_2'' - m_1'' = 0.144 - 0.08 = 0.064 \text{ Kgm.}$$

PROBLEMA 2.7

El freón-12 originalmente se halla a las condiciones de $\log_{10} v = -1.4$ y una temperatura de 150°C , luego se realiza su enfriamiento a la misma presión hasta vapor saturado seco, se pide:

- Graficar el proceso en los diagramas (T-s) y (p-h) de sustancia pura.
- Evalue los grados de recalentamiento de la condición original; y v , h , s , p , t , antes y después del enfriamiento.
- Evalue los incrementos de entropía y de entalpía.

Solución:

a) Se puede plantear que:

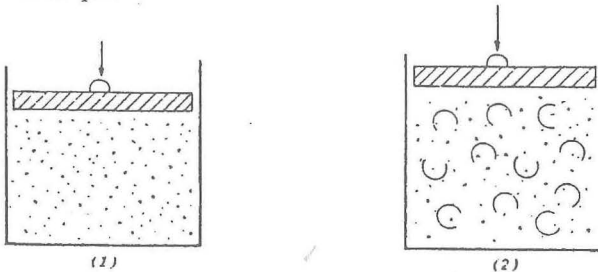


FIG.2.7

En los diagramas (T-s) y (p-h) tendremos:

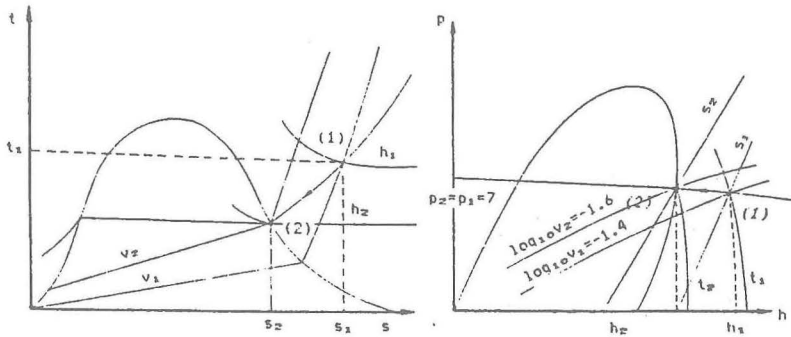


FIG.2.8

b) Del diagrama (p-h), se puede obtener:

$$h_1 = 286 \text{ KJ/Kg.}, t_1 = 150 \text{ }^\circ\text{C}, p_1 = 7 \text{ bares,}$$

$$v_1 = \text{antilog}_{10}^{-1.4} = 0.03981 \text{ m}^3/\text{Kg.}$$

$$s_1 = 0.93 \text{ KJ/Kg-K}$$

$$h_2 = 198 \text{ KJ/Kg.}, t_2 = 28 \text{ }^\circ\text{C}, p_2 = 7 \text{ bares,}$$

$$v_2 = \text{antilog}_{10}^{-1.6} = 0.02512 \text{ m}^3/\text{Kg.},$$

$$s_2 = 0.687 \text{ KJ/Kg-k}$$

$$t_1 - t_2 = \text{grados de recalentamiento}$$

$$= 150 - 28 = 122 \text{ }^\circ\text{C.}$$

$$c) (s_2 - s_1) = 0.687 - 0.93 = -0.243 \text{ KJ/KG-K}$$

$$(h_2 - h_1) = 198 - 286 = -88 \text{ KJ/Kg.}$$

PROBLEMA 2.8

Para el monóxido de carbono (CO) que se comprime desde $14.29 \cdot 10^{-3}$ bares y 266 K, hasta 17.5 bares y 1995 K, calcular el factor de compresibilidad Z con la carta generalizada antes y después de la compresión.

Si la desviación respecto al gas ideal se limitara al 1 por ciento como máximo, se podría considerar que su comportamiento es del gas ideal?.

Solución:

De tablas para el (CO):

$$p_c = 3.50 \text{ MP}_a, T_c = 133 \text{ K.}$$

Luego: $T_{r1} = 266/133 = 2$,
 $p_{r1} = 14.29 \cdot 10^{-3}/35 = 4.08 \cdot 10^{-4}$
 $T_{r2} = 1995/133 = 15$, $p_{r2} = 17.5/35 = 0.5$
 De carta: $Z_1 = 1$; $Z_2 = 1.01$

Como puede verse en (1) no hay desviación y en (2) ésta solo es del 1%
 Por lo que podemos decir que el comportamiento del (CO) es el de gas ideal.

PROBLEMA 2.9

El FREON-12, originalmente se halla a las condiciones normales de 150 °C y 7 bares, si luego se realiza su enfriamiento a la misma presión hasta vapor saturado seco.

Utilizar: $C_p = 0.532 \text{ KJ/Kgm-K}$;
 $R = 68.7 \text{ J/Kgm-K}$; $M = 120.92 \text{ Kgm/KMOL}$.

Se pide:

- a) Evaluar el cambio de entalpía en KJ/Kgm.
- b) Evaluar el cambio de entropía en KJ/Kgm-K.

Solución:

a) Podemos cambiar el siguiente esquema del proceso:

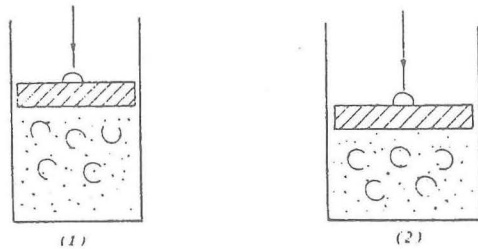


FIG. 2.9

Que traducido en el diagramma (T-s) sería:

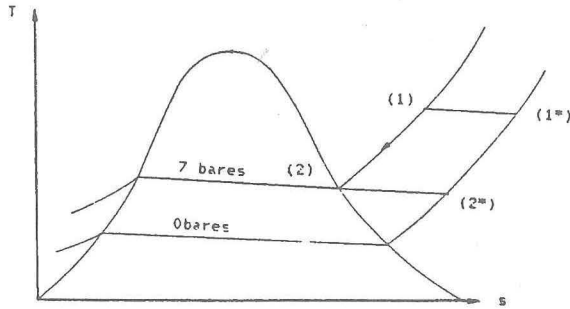


FIG. 2.10

y con $(h_2-h_1) = -(h_2^*-h_2) + (h_2^*-h_1^*) + (h_1^*-h_1)$

De tablas: $T_c = 384.7\text{K}$, $p_c = 4.01\text{MPa}$.

$$T_{r1} = (150+273) / 384.7 = 1.09;$$

$$p_{r1} = 7/40.1 = 0.17$$

$$p_{r2} = 7/40.1 = 0.17$$

$$T_{r2} = 0.788 \text{ (de saturación)}.$$

De carta: $h_2^*-h_2 = 2.78*384.7/120.91$
 $= 8.85\text{ KJ/Kgm.}$

$$h_1^*-h_1 = 1.11*384.7/120.91 = 3.53\text{ KJ/Kgm.}$$

$$h_2^*-h_1 = C_p(T_2-T_1);$$

$$T_2 = 0.788*384.7 = 303.14\text{ K.}$$

$$t_2 = 30.14\text{ }^\circ\text{C.}$$

$$h_2^*-h_1^* = 0.532(30.14-150) = -63.77\text{ KJ/Kg.}$$

Reemplazando:

$$h_2-h_1 = -8.85-63.77+3.53 = -69.09\text{ KJ/Kg.}$$

b) De:

$$(s_2-s_1) = -(s_2^*-s_2) + (s_2^*-s_1^*) + (s_1^*-s_1)$$

De carta: $s_2^*-s_2 = 3.33/120.91\text{ KJ/Kg-K}$
 $= 0.0275\text{ KJ/Kg-K.}$

$$s_1^*-s_1 = 1.11/120.91 = 0.0092\text{ KJ/Kg-K.}$$

$$s_2^*-s_1^* = 0.532 \ln(303.14/423) - 0$$

$$= -0.1773\text{ KJ/Kg-K.}$$

Reemplazando:

$$s_2-s_1 = -0.0275-0.1773+0.0092$$

$$= -0.1956\text{ KJ/Kg-K.}$$

PROBLEMA 2.10

En un depósito rígido y cerrado cuyas dimensiones son $a*b*c \text{ m}^3$, originalmente se halla una mezcla líquido-vapor de agua con una calidad x_1 y una presión de p_1 bares.

Luego mediante un calentamiento se logra que la calidad del vapor húmedo sea de x_2 y una presión de p_2 bares. Si el volumen específico de la mezcla es igual a $v_1 \text{ m}^3/\text{Kgm}$, se pide:

- a) Indique las expresiones para evaluar el factor de compresibilidad, antes y después del calentamiento. Desarrollelo.
- b) Demostrar que el cambio de entalpía $(\bar{h}_2 - \bar{h}_1)$ está dado por la expresión:

$$-T_c[\theta - x_2(\theta - \gamma)] + \bar{C}_p(T_2 - T_1) + T_c[\alpha - x_1(\alpha - \beta)]$$

Donde: $(\bar{h}_1^* - \bar{h}_1)/T_c = \alpha$; $(\bar{h}_1^* - \bar{h}'')/T_c = \beta$
 $(\bar{h}_2 - \bar{h}')/T_c = \theta$; $(\bar{h}_2^* - \bar{h}'')/T_c = \gamma$

Solución:

- a) El proceso sería el siguiente:



FIG. 2.11

En donde $V_1 = V_2$; $m_1 \cdot v_1 = m_2 \cdot v_2$;

$v_1 = v_2 \text{ m}^3/\text{Kgm}$.

de: $p_1 v_1 = Z_1 \cdot R \cdot T_1 \quad \therefore Z_1 = p_1 \cdot v_1 / R \cdot T_1$;

$T_1 = T_{r1} \cdot T_c$, con p_{r1}

de: $p_2 v_2 = Z_2 \cdot R \cdot T_2 \quad \therefore Z_2 = p_2 \cdot v_2 / R \cdot T_2$;

$T_2 = T_{r2} \cdot T_c$, con p_{r2}

Pero también con $z = z' + x(z'' - z')$;

con p_{r1} ; z' y z''

con p_{12} ; z' y z''

Entonces:

$$z_1 = z'' + x_1(z'' - z')$$

$$z_2 = z' + x_2(z'' - z')$$

b) En el diagrama (T-s), tendríamos:

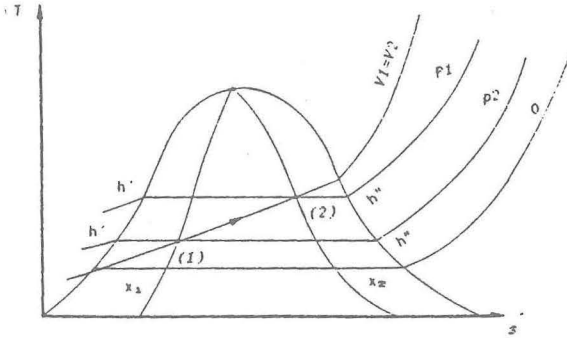


FIG. 2.12

De:

$$(\bar{h}_2 - \bar{h}_1) = -(\bar{h}_2^* - \bar{h}_2) + (\bar{h}_2^* - \bar{h}_1^*) + (\bar{h}_1 - \bar{h}_1')$$

se puede escribir:

$$(\bar{h}_1^* - \bar{h}_1) = \bar{h}_1^* - h' - x_1(\bar{h}'' - \bar{h}')$$

De carta con:

$$P_{r1} \cdot \bar{h}_1^* - h' = \alpha \cdot Tc; h_1^* - \bar{h}'' = \beta \cdot Tc$$

$$\therefore \bar{h}'' - \bar{h} = Tc (\alpha - \beta)$$

Reemplazando:

$$(\bar{h}_1^* - \bar{h}_1) = a \cdot Tc - x_1 \cdot Tc (\alpha - \beta)$$

$$(\bar{h}_1^* - \bar{h}_1) = Tc [\alpha - x_1 (\alpha - \beta)]$$

Del mismo modo:

$$(\bar{h}_2^* - \bar{h}_2) = \bar{h}_2^* - \bar{h}' - x_2 (\bar{h}'' - \bar{h}')$$

De carta con:

$$P_{r2}; \bar{h}_2^* - \bar{h}' = \theta \cdot T_c; \bar{h}_2 - \bar{h}'' = \gamma \cdot T_c$$

$$\therefore h'' - h' = T_c (\theta - \beta)$$

Reemplazando:

$$(\bar{h}_2^* - \bar{h}_2) = \theta \cdot T_c - x_2 \cdot T_c (\theta - \gamma) = T_c [\theta - x_2 (\theta - \gamma)]$$

y como:

$$(\bar{h}_2^* - \bar{h}_1^*) = \bar{C}_p (T_2 - T_1); T_2 = T_{r2} \cdot T_c; T_1 = T_{r1} \cdot T_c$$

Reemplazando en la expresión principal:

$$(h_2 - h_1) = - T_c [\theta - x_2 (\theta - \gamma)] + C_p (T_2 - T_1) + \\ + T_c [\alpha - x_1 (\alpha - \beta)] L \cdot Q \cdot Q \cdot D$$

PROBLEMA 2.11

En un depósito rígido y cerrado, originalmente se halla una mezcla líquido-vapor de freón-12 a 40 °C, con una calidad de 0.50 y una masa total de 20 Kgm.

Luego, mediante un calentamiento se logra que la calidad del vapor húmedo sea de 0.90. Se pide:

- Graficar el proceso en los diagramas de estado (p-v) y (T-s).
- Evaluar la temperatura de la mezcla en el estado final, la cantidad de freón-12 que se evaporó en Kgm., y el volumen del depósito en m³.

Solución:

- El esquema del proceso es:

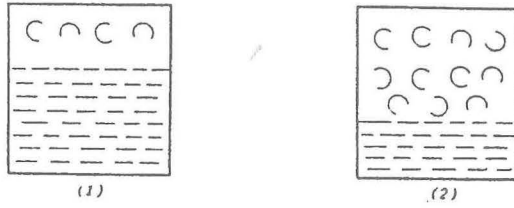


FIG. 2.13

$$\text{De } V_1 = V_2 \quad \therefore \quad m_1 v_1 = m_2 v_2; \quad v_1 = v_2$$

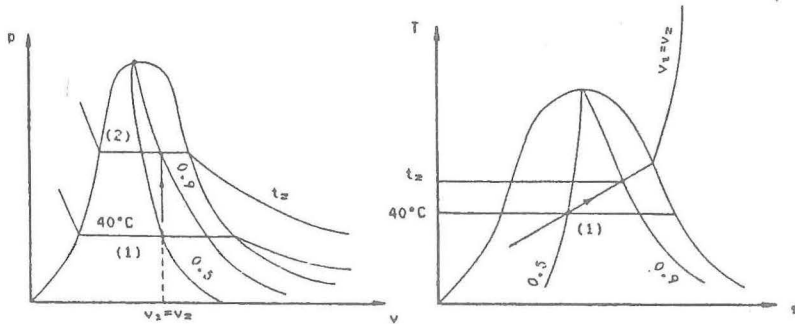


FIG. 2.14

$$\begin{aligned} \text{b) } v_1 = v_2 = 0.0094845 &= v' + 0.9(v'' - v') \\ 0.0094845 &\neq 0.0100857 \rightarrow 60 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 0.0094845 &\neq 0.0089509 \rightarrow 65 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Interpolando: $t_2 = 62.5 \text{ } ^\circ\text{C}$

Freón evaporado: $m_2'' - m_1'' = 18 - 10 = 8 \text{ Kg.}$

$$V = m \cdot v = 20 \cdot 0.0094845 = 0.18969 \text{ m}^3$$

$$\therefore V = 0.18969 \text{ m}^3$$

PROBLEMA 2.12

Un depósito rígido y cerrado tiene 20 Kg. de vapor húmedo de freón-12 a $40 \text{ } ^\circ\text{C}$. El 4.21% del volumen del depósito está con freón líquido; y el 95.79% del volumen del depósito está como vapor saturado seco. La constante R del freón-12 es de $68.7 \text{ J/Kg}\cdot\text{K}$. Se pide:

a) Evaluar la masa de líquido y la masa de vapor, en Kg. respectivamente.

- b) Evaluar el volumen total del depósito en m^3 , y el factor de compresibilidad de la mezcla.

Solución:

- a) El esquema sería:

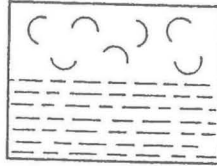


FIG. 2.15

De; $PV' = m'.Z'.R.T$; y $PV'' = m''.Z''.R.T$

$$0.0421 * m''.Z'' = 0.9579 * m'.Z'$$

con $T_r = 313/384.7 = 0.80$;

$p_r = 0.22$ (saturación).-De carta.

$$p = 0.22 * 4.01 = 0.8827 \text{ MPa.}$$

Asimismo: $Z' = 0.03$

$$Z'' = 0.82$$

Entonces:

$$0.0421(20-m') * 0.82 = 0.9579 * m' * 0.03$$

$$\therefore m' = 10.92 \text{ Kgm}; m'' = 9.08 \text{ Kgm.}$$

b)

$$V' = \frac{10.92 * 0.03 * 68.7 * 313}{8.822 * 10^5} = 0.007985 \text{ m}^3$$

$$V'' = \frac{9.08 * 0.82 * 68.7 * 313}{8.822 * 10^5} = 0.181482 \text{ m}^3$$

$$\therefore V = 0.189467 \text{ m}^3$$

$$y; Z = \frac{8.822 * 10^5 * 0.189467}{20 * 68.7 * 313} = 0.388$$

o con: $z = z' + x_1(z'' - z')$

$$x_1 = m''/m$$

PROBLEMA 2.13

En un depósito rígido y cerrado, originalmente se halla una mezcla líquido-vapor de freón-12 con una calidad de 0.50 y una temperatura de 40 °C. Luego, mediante un calentamiento se logra que la calidad del vapor húmedo sea de 0.90 y la temperatura de 62.5 °C. Considerar que el C_p es de 0.532 KJ/Kg-K, la constante R es de 0.0687 KJ/Kg-K, y la masa molecular es de 120.92 Kg/KMOL. Se pide:

- Evaluar el cambio de entalpia (h_2-h_1)
- Evaluar el cambio de entropia (s_2-s_1)
- Evaluar antes y después del calentamiento, la presión, y el factor de compresibilidad.

Solucion:

a) Siguiendo el procedimiento del problema (2.10): de;

$$(\bar{h}_2 - \bar{h}_1) = -(\bar{h}_2^* - \bar{h}_2) + (\bar{h}_2^* - \bar{h}_1^*) + (\bar{h}_1^* - \bar{h}_1)$$

con $T_{r1} = 0.81$ y $T_{r2} = 0.87$

$$(\bar{h}_2^* - \bar{h}_1^*) = 16926.8 ; \bar{h}'' - \bar{h}' = 14618.6$$

$$\therefore \bar{h}_2^* - \bar{h}_2 = 16926.8 - 0.9 * 14618.6 = 3770.06$$

$$\bar{h}_1^* - \bar{h}_1 = 18388.66; h'' - h' = 17157.6$$

$$\therefore \bar{h}_1^* - \bar{h}_1 = 18388.66 - 0.5 * 17157.6 = 9809.86$$

$$y \bar{h}_2^* - \bar{h}_1 = 0.5232 * 120.92 (62.5 - 40) = 1447.41$$

$$Reemplazando: (h_2 - h_1) = 7487.21 \text{ KJ/KMOL}$$

b) De:

$$(s_2 - s_1) = - (s_2^* - s_2) + (s_2^* - s_1^*) + (s_1^* - s_1)$$

$$Pero: \bar{s}_2^* - \bar{s}' = 48 ; \bar{s}'' - \bar{s}' = 43$$

$$\therefore \bar{s}_2^* - \bar{s}_2 = 48 - 0.9 * 43 = 9.3$$

$$\bar{s}_1^* - \bar{s}' = 57.2; s'' - s' = 54$$

$$\therefore \bar{s}_1^* - \bar{s}_1 = 57.2 - 0.5 * 54 = 30.2$$

$$y \bar{s}_2^* - \bar{s}_1^* = 0.532 * 120.92 \ln \frac{335.5}{313} - 0.0687^*$$

$$*120.92 \ln \frac{1.5238}{0.8822}$$

Reemplazando: $(\bar{s}_2 - \bar{s}_1) = 20.8254 \text{ KJ/KMOL} - K$

c) Como: $P_{r1} = P_1/P_c$ y $P_{r2} = P_2/P_c \therefore p_1 = 0.8822 \text{ MPa}$.

$p_2 = 1.5238 \text{ MPa}$.

$Z_1 = 0.03 + 0.5(0.82 - 0.03) = 0.425$

$Z_2 = 0.04 + 0.9(0.75 - 0.04) = 0.679$

PROBLEMA 2.14

Freón-12, originalmente se halla a las condiciones de 40°C y 0.50 de calidad, si luego se realiza su calentamiento hasta 62.5°C y 0.90 de calidad, se pide: Evaluar antes y después del calentamiento: h , v , p . Asimismo, el incremento de la entalpía en KJ/KMOL , y s después del calentamiento.

Solución

Del diagrama (p-h) para el freón-12, con la información dada, el proceso puede graficarse:

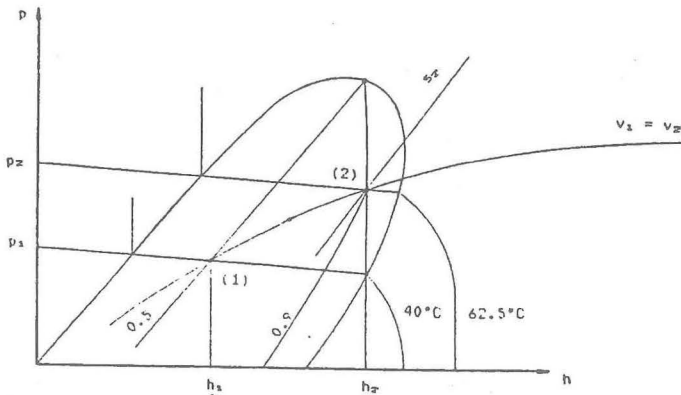


FIG. 2.16

Ubicados los puntos (1) y (2) ; se puede leer:

$$\log_{10} v = -2.02$$

$$\therefore v_1 = v_2 = 0.0095499 \text{ m}^3/\text{Kg.}$$

$$p_1 = 9.6 \text{ bares; } p_2 = 16 \text{ bares}$$

$$h_1 = 138 \text{ KJ/Kg; } h_2 = 198 \text{ KJ/Kg.}$$

$$s_2 = 0.64 \text{ KJ/Kg-K}$$

$$\Delta h = (h_2 - h_1) = (198 - 138) = 60 \text{ KJ/Kg.}$$

$$\Delta h = 60 * 120.92 = 7255.20 \text{ KJ/KMOL.}$$

PROBLEMA 2.15

Considere la figura siguiente, en donde la información técnica es:

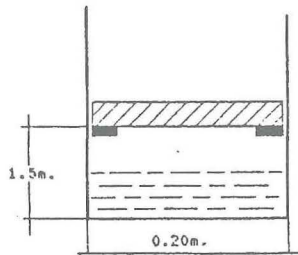


FIG. 2.17

temp. amoniaco (líquido saturado) = $-34 \text{ }^{\circ}\text{C}$

masa amoniaco (líquido saturado) = 0.5 Kg.

masa del pistón = 50 Kg.

Presión atmosférica = $1 * 10^5 \text{ N/m}^2$.

Aceleración de la gravedad local = 9.81 m/s^2 .

Se pide:

- Calcular la temperatura del amoniaco líquido, justo cuando el pistón comienza a elevarse al transferirse calor.
- Calcular la altura hasta donde el pistón se elevó, cuando el cilindro contenga vapor de amoniaco saturado seco, debido a la transferencia de calor.
- Dibujar los diagramas (p-v) y (T-s) de sustancia pura.

Solución:

a) Cuando el pistón comienza a elevarse es porque debido a la transferencia de calor ha llegado a la presión de evaporación. Entonces en el equilibrio:

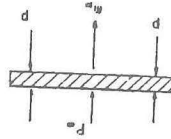


FIG. 2.18

$$P = P_o + m_p \cdot g / \Delta p;$$

reemplazando:

$$P = 100 + 50 \cdot 9.81 / 0.031416 = 115.613 \text{ KPa.}$$

De tablas e interpolando: $t_2 = -30.69 \text{ }^\circ\text{C}$

$$v_2'' = 0.9954815 \text{ m}^3/\text{Kgm.}$$

b) Cuando se ha llegado a vapor saturado seco el pistón habrá subido:

$$0.5 \cdot 0.9954815 = 0.031416 \cdot h$$

$$\therefore h = 15.84 - 1.5 = 14.34 \text{ m.}$$

c) Los diagramas (p-v) y (T-s) serán:

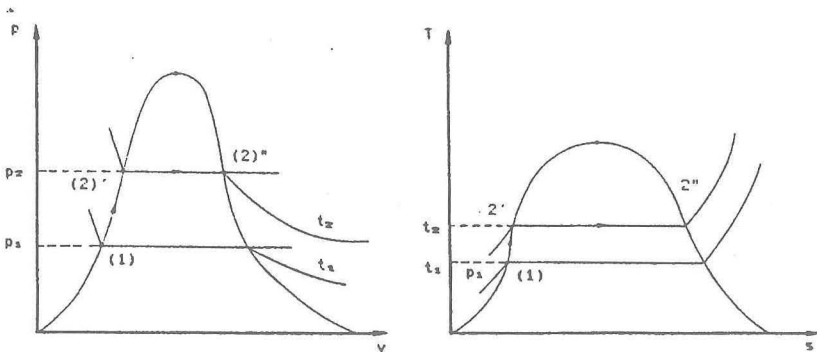


FIG. 2.19

PROBLEMA 2.16

El gas etileno (C_2H_4) se expandiona desde 1.6 y 2.5 de temperatura y presión reducidas, hasta 1.35 y 1.5 de temperatura y presión reducidas. Se pide:

- a) Utilizando cartas generalizadas, calcular: (h_2-h_1) y (s_2-s_1)
- b) Si el gas metano (CH_4) tiene la misma temperatura y presión, reducidas que el etileno antes de la expansión, mediante cálculo demuestre la ley de los estados correspondientes.

Solución:

a) La expansión en el diagrama (T-s) es :

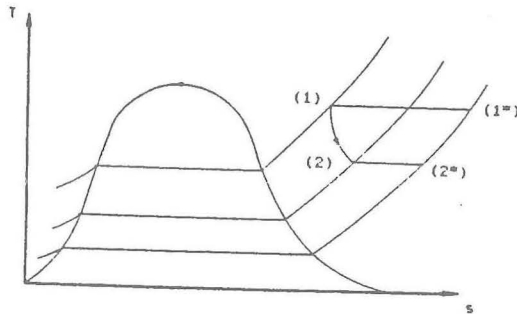


FIG. 2.20

$$P_1 = 5.12 \cdot 2.5 = 12.8 \text{ MPa.}$$

$$T_1 = 282.4 \cdot 1.60 = 451.84 \text{ K.}$$

$$P_2 = 5.12 \cdot 1.5 = 7.68 \text{ MPa.}$$

$$T_2 = 282.4 \cdot 1.35 = 381.24 \text{ K.}$$

De carta con $P_{r1}, T_{r1}; P_{r2}, T_{r2}$

$$(\bar{h}_1^* - \bar{h}_1) / T_c = 8.4; (\bar{h}_2^* - \bar{h}_2) / T_c = 8.0;$$

$$\bar{s}_1^* - \bar{s}_1 = 4.0; \bar{s}_2^* - \bar{s}_2 = 3.0$$

Reemplazando en:

$$\Delta \bar{h} = -(\bar{h}_2^* - \bar{h}_2) + (\bar{h}_2^* - \bar{h}_1^*) + (\bar{h}_1^* - \bar{h}_1)$$

$$\therefore \Delta \bar{h} = -2259.2 + 1.5482 \cdot 28.054(381.24 - 451.84) + 2372.16$$

$$\therefore \Delta \bar{h} = -2953.42 \text{ KJ/KMOL.}$$

$$\Delta \bar{s} = -(\bar{s}_2^* - \bar{s}_2) + (\bar{s}_2^* - \bar{s}_1^*) + (\bar{s}_1^* - \bar{s}_1)$$

$$\Delta \bar{s} = -3 + 1.5482 * 28.054 \ln(381.24/451.84) - 8.3143 \ln(7.68/12.8) + 4$$

$$\therefore \Delta s = 2.1321 \text{ KJ/KMOL-K}$$

b) De:

$$v_r = \frac{Z \cdot \bar{R} \cdot T_c \cdot Tr}{P_c \cdot Pr \cdot v_c} * 1000$$

de carta: $z_1 = 0.87$

Luego:

$$v_r(C_2H_4) = \frac{0.87 * 8.3143 * 282.4 * 1.6 * 1000}{51.2 * 10^5 * 2.5 * 0.1242}$$

$$= 0.2055$$

$$\therefore v_r(C_2H_4) \cong 0.2$$

$$v_{r(CH_4)} = \frac{0.87 * 8.3143 * 191.1 * 1.6 * 1000}{46.4 * 10^5 * 2.5 * 0.0993} = 0.192$$

$$\therefore v_r(CH_4) \cong 0.2$$

Luego: $v_r(C_2H_4) = v_r(CH_4) = 0.2$; lo cual significa que estan en estados correspondientes.

PROBLEMA 2.17

El refrigerante diclorodifluormetano (CF_2Cl_2), freón-12, se encuentra a una presión absoluta de 4 bares y $90^\circ C$. Se pide: Con diagrama (p-h) primero, y luego con tablas de propiedades termodinámicas:

- Para el proceso isobárico, donde $x_2 = 0.9$: s_2, v_2, h_2 .
- Para el proceso isentrópico, donde $p_2 = 19$ bares absolutos: v_2, h_2, s_2
- Para el proceso isotérmico, donde $p_2 = 1.3$ bares absolutos: v_2, h_2, s_2 .

Solución

a) De acuerdo a la información dada los tres procesos se pueden representar en el diagrama (p-h):

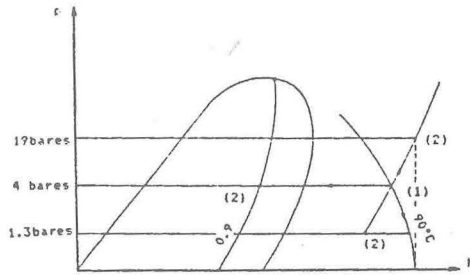


FIG. 2.21

- a) Se lee: $s_2 = 0.64$; $v_2 = 0.03981$;
 $h_2 = 176$
- b) $s_2 = 0.862$; $v_2 = 0.01318$;
 $h_2 = 286$
- c) $s_2 = 0.943$; $v_2 = 0.19275$;
 $h_2 = 248$

Con tablas de propiedades termodinámicas:

a) Con 4 bares, interpolando:

$$s_2 = 0.1687 + 0.9(0.6924 - 0.1687) = 0.64003$$

$$v_2 = 0.000729 + 0.9(0.043436 - 0.000729) = 0.0391653$$

$$h_2 = 43.54 + 0.9(179.29 - 43.54) = 165.715$$

b) Con 4 bares y 90 °C : $s_1 = s_2 = 0.8638$ y con 19 bares, interpolando: $s_2 = 0.86505$;

$$v_2 = 0.01395; h_2 = 285.696$$

c) Con 90 °C y 1.3 bares, interpolando: $s_2 = 0.94692$; $v_2 = 0.197128$; $h_2 = 248.1904$

PARTE III

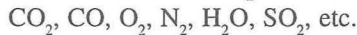
3. MEZCLA DE GASES IDEALES

En muchos procesos termodinámicos se trabaja con mezclas de gases y vapores.

Por ejemplo el aire ambiente es una mezcla típica de gases y vapores, siguientes: N_2 , O_2 , Ar, Ne, Kr, CO_2 , CO, H_2O , etc.

También, los productos de combustión en una caldera de vapor, en un motor de combustión interna, en un horno de siderurgia, de una central térmica convencional de turbina de gas, etc, etc.

Dependiendo de la cantidad de aire a suministrar con el combustible que se quema, los productos de la combustión podrían ser:



Por eso, es necesario conocer el comportamiento de estos portadores de energía como mezclas.

3.1 DEFINICIONES IMPORTANTES

Consideremos un recipiente que contiene una mezcla de tres gases diferentes x, y, z.

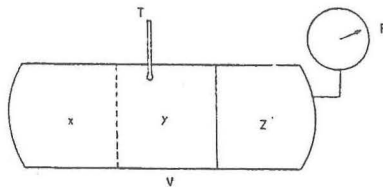


FIG. 3.1

Entonces, podemos establecer que:

3.1.1 MASA FRACCION DE CADA COMPONENTE

$$m = m_x + m_y + m_z$$

$$\therefore m = \sum_{i=1}^{i=n} m_i$$

$$\text{Luego: } m_{fx} = \frac{m_x}{m}; m_{fy} = \frac{m_y}{m}; m_{fz} = \frac{m_z}{m}$$

$$\therefore m_{fi} = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^{i=n} m_i}$$

Es decir que: $m_{fx} + m_{fy} + m_{fz} = 1$

$$\therefore \sum_{i=1}^{i=n} m_{fi} = 1$$

3.1.2 MOL FRACCION DE CADA COMPONENTE

$$n = n_x + n_y + n_z$$

$$\therefore n = \sum_{i=1}^{i=n} n_i$$

Luego: $n_{fx} = n_x/n$; $n_{fy} = n_y/n$; $n_{fz} = n_z/n$

$$\therefore n_{fi} = \frac{n_i}{\sum_{i=1}^{i=n} n_i}$$

Es decir que: $n_{fx} + n_{fy} + n_{fz} = 1$

$$\therefore \sum_{i=1}^{i=n} n_{fi} = 1$$

3.1.3 LEY DE LAS PRESIONES PARCIALES

Para establecer esta ley, se considera que cada gas actúa con su propia pre-

sión parcial: p_x, p_y, p_z , ocupando el volumen total V y a la temperatura total T , de la mezcla. Es decir:

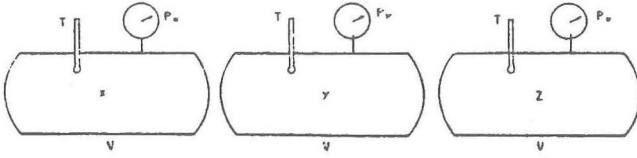


FIG. 3.2

Por lo que podemos establecer que:

$$P = P_x + P_y + P_z$$

$$\therefore P = \sum_{i=1}^{i=n} p_i$$

3.1.4 LEY DE LOS VOLUMENES PARCIALES

En este caso, que cada gas ocupa su volumen parcial: V_x, V_y, V_z , a la presión total P y a la temperatura total T , de la mezcla. Es decir:

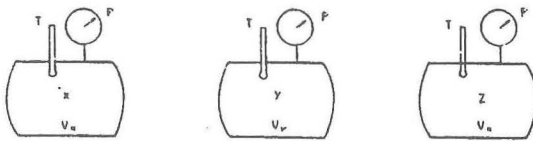


FIG. 3.3

Por lo que podemos establecer que:

$$V = V_x + V_y + V_z$$

$$\therefore V = \sum_{i=1}^{i=n} V_i$$

3.1.5 VOLUMEN FRACCION DE CADA COMPONENTE

$$V_{fx} = V_x/V; V_{fy} = V_y/V; V_{fz} = V_z/V$$

$$\therefore V_{fi} = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^{i=n} V_i}$$

Conjugando las expresiones anteriores se puede obtener las relaciones importantes:

$$\frac{P_x}{P} = \frac{V_x}{V} = \frac{n_x}{n}$$

$$\therefore \frac{P_i}{\sum_{i=1}^{i=n} P_i} = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^{i=n} V_i} = \frac{n_i}{\sum_{i=1}^{i=n} n_i}$$

3.1.6 OTRAS RELACIONES IMPORTANTES

$$R_m = m_{fx} \cdot R_x + m_{fy} \cdot R_y + m_{fz} \cdot R_z \therefore R_m = \sum_{i=1}^{i=n} m_{fi} \cdot R_i$$

$$R_m \cdot M_m = \bar{R} \therefore M_m = \frac{\bar{R}}{\sum_{i=1}^{i=n} m_{fi} \cdot R_i}$$

$$M_m = \frac{1}{\frac{m_{fx}}{M_x} + \frac{m_{fy}}{M_y} + \frac{m_{fz}}{M_z}} \therefore M_m = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{m_{fi}}{M_i}}$$

$$C_{pm} = m_{fx} \cdot C_{px} + m_{fy} \cdot C_{py} + m_{fz} \cdot C_{pz} \therefore C_{pm} = \sum_{i=1}^{i=n} m_{fi} \cdot C_{pi}$$

$$C_{pm} = n_{fx} \cdot \bar{C}_{px} + n_{fy} \cdot \bar{C}_{py} + n_{fz} \cdot \bar{C}_{pz} \therefore \bar{C}_{pm} = \sum_{i=1}^{i=n} n_{fi} \cdot \bar{C}_{pi}$$

$$C_{vm} = m_{fx} \cdot C_{vx} + m_{fy} \cdot C_{vy} + m_{fz} \cdot C_{vz} \therefore C_{vm} = \sum_{i=1}^{i=n} m_{fi} \cdot C_{vi}$$

$$\bar{C}_{vm} = n_{fx} \cdot \bar{C}_{vx} + n_{fy} \cdot \bar{C}_{vy} + n_{fz} \cdot \bar{C}_{vz} \therefore \bar{C}_{vm} = \sum_{i=1}^{i=n} n_{fi} \cdot \bar{C}_{vi}$$

$$K_m = \frac{C_{pm}}{C_{vm}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} m_{fi} \cdot C_{pi}}{\sum_{i=1}^{i=n} m_{fi} \cdot C_{vi}}$$

$$K_m = \frac{\bar{C}_{pm}}{\bar{C}_{vm}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} n_{fi} \cdot \bar{C}_{pi}}{\sum_{i=1}^{i=n} n_{fi} \cdot \bar{C}_{vi}}$$

3.1.7 ENERGIA INTERNA DE LA MEZCLA

$$U_m = U_x + U_y + U_z \therefore U_m = \sum_{i=1}^{i=n} U_i$$

$$u_m = m_{fx} \cdot u_x + m_{fy} \cdot u_y + m_{fz} \cdot u_z \therefore U_m = \sum_{i=1}^{i=n} m_{fi} \cdot C_{vi}$$

Para un cambio de estado:

$$\begin{aligned} \Delta u_m &= C_{vm} \cdot \Delta T \\ \Delta U_m &= m \cdot C_{vm} \cdot \Delta T \end{aligned}$$

3.1.8 ENTALPIA DE LA MEZCLA

$$H_m = h_x + H_y + H_z \therefore H_m = \sum_{i=1}^{i=n} H_i$$

$$h_m = m_{fx} \cdot h_x + m_{fy} \cdot h_y + m_{fz} \cdot h_z \therefore h_m = \sum_{i=1}^{i=n} m_{fi} \cdot h_i$$

Para un cambio de estado:

$$\begin{aligned} \Delta h_m &= C_{pm} \cdot \Delta T \\ \Delta H_m &= m \cdot C_{pm} \cdot \Delta T \end{aligned}$$

3.1.9 ENTROPIA DE LA MEZCLA

$$S_m = S_x + S_y + S_z \therefore S_m = \sum_{i=1}^{i=n} S_i$$

$$S_m = m_{fx} \cdot S_x + m_{fy} \cdot S_y + m_{fz} \cdot S_z \therefore S_m = \sum_{i=1}^{i=n} m_{fi} \cdot S_i$$

Para un cambio de estado:

$$\Delta S_m = C_{pm} \ln(T_2/T_1) - R \cdot \ln(p_2/p_1)$$

$$\Delta S_m = m \cdot C_{pm} \ln(T_2/T_1) - m \cdot R \cdot \ln(p_2/p_1)$$

3.2 ANALISIS EN PORCENTAJE DE MASA DE LA MEZCLA Y ANALISIS EN PORCENTAJE DE VOLUMEN DE LA MEZCLA

3.2.1 DADO EL ANALISIS EN PORCENTAJE DE VOLUMEN PASAR AL ANALISIS EN PORCENTAJE DE MASA.

El siguiente cuadro, simplifica el análisis; considerando como base 1 KMOL de mezcla:

COMP	VOL.FRAC.	VOL.FRAC.*M	MASA (Kg/KMOL.MEZCL)	%MASA *100
x	V_x / V	$(V_x / V) * M_x$	m_x	(m_x / m)
y	V_y / V	$(V_y / V) * M_y$	m_y	(m_y / m)
z	V_z / V	$(V_z / V) * M_z$	m_z	(m_z / m)
			m	

3.2.2 DADO EL ANALISIS EN PORCENTAJE DE MASA PASAR AL ANALISIS EN PORCENTAJE DE VOLUMEN

Aquí se considera como base 1 Kgm. de mezcla:

COMP	MASA.FRAC.	MASA.FRAC.*M	MOLES (KMOL/KG.MEZCL)	%MOLES (VOLUM) *100
x	m_x / m	$(m_x / m) \div M_x$	n_x	(n_x / n)
y	m_y / m	$(m_y / m) \div M_y$	n_y	(n_y / n)
z	m_z / m	$(m_z / m) \div M_z$	n_z	(n_z / n)
			n	

PROBLEMAS DE APLICACION

PROBLEMA 3.1

Un gas natural cuya composición en términos de porcentaje de volumen es : CH_4 , 68.4; C_2H_6 , 30.4; CO_2 , 0.1; N_2 , 1.1, fluye por una tubería a razón de 0.5 Kg/m/s y a una velocidad de $c_1 = c_2$ m/s.

En la sección de entrada se tiene:

$d_1 = 0.20$ m, $P_1 = 40$ bar, y $t_1 = 343.6$ °C. Mientras que en la sección de salida: $p_2 = 40$ bar, $t_2 = 143.6$ °C.

Se pide evaluar: las variaciones de la energía interna, de la entalpía, y de la entropía, totales; y el valor del diámetro de la tubería a la salida, en metros.

Solución:

El esquema técnico sería:

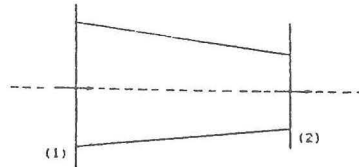


FIG. 3.1

De las relaciones:

$$(U_2 - U_1) = m_m \cdot C_{vm} \cdot (T_2 - T_1)$$

$$(H_2 - H_1) = m_m \cdot C_{pm} \cdot (T_2 - T_1)$$

$$(S_2 - S_1) = m_m \cdot C_{pm} \cdot \ln(T_2/T_1) - m_m \cdot R_m \cdot \ln(P_2/P_1)$$

De modo que:

CONSTITU	VOL.FRAC	VOL.FRAC*M.	MASA	% MASA
CH_4	0.684	0.684 * 46.04	10.97136	0.5361
C_2H_6	0.304	0.304 * 30.07	9.1400	0.4467
CO_2	0.001	0.001 * 44.01	0.0440	0.00215
N_2	0.011	0.011 * 28.01	0.3080	0.01505
			<u>20.46336</u>	<u>1.0000</u>

$$C_{pm} = 0.5361 * 2.2537 + 0.4467 * 1.7662 + 0.00215 * 0.8418 + 0.01505 * 1.0416$$

$$\therefore C_{pm} = 2.0147 \text{ KJ/Kg-K.}$$

$$C_{vm} = 0.5361 * 1.7354 + 0.4467 * 1.4897 + 0.00215 * 0.6529 + 0.01505 * 0.7448$$

$$\therefore C_{vm} = 1.6084 \text{ KJ/Kg-K}$$

$$\text{Luego: } R_m = 0.4063 \text{ KJ/Kg-K.}$$

$$\text{De; } PV = m.R.T \quad \therefore \rho = P/(R.T)$$

$$\therefore \rho_1 = 15.97 \text{ Kg/m}^3, \quad \rho_2 = 23.63 \text{ Kg/m}^3$$

Reemplazando:

$$U_2 - U_1 = 0.5 * 1.6084 (416.6 - 616.6) = -160.84 \text{ KJ/s}$$

$$(H_2 - H_1) = 0.5 * 2.0147 (416.6 - 616.6) = -201.47 \text{ KJ/s}$$

$$(S_2 - S_1) = 0.5 * 2.0147 \ln(416.6/616.6) - 0.5 * 0.4063 \ln(40/40) = -0.3950 \text{ KJ/K-s}$$

y de:

$$A_2 = \frac{\rho_1}{\rho_2} * A_1 = \frac{15.97}{23.63} * 0.31416 = 0.212 \text{ m}^2$$

$$\therefore d_2 = \sqrt{\frac{4A_2}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 * 0.212}{3.1416}} = 0.1643 \text{ m.}$$

PROBLEMA 3.2

Considere el esquema técnico que muestra la figura siguiente:

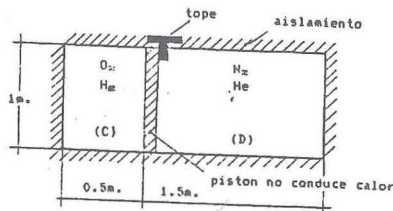


FIG. 3.2

Condiciones iniciales en el lado (C) antes de sacar el tope y en el equilibrio:

$$m_{O_2} = 2.5 \text{ Kgm}, m_{He} = 2.5 \text{ Kgm}, T_c = 436.5 \text{ K}.$$

y en el lado(D):

$$m_{N_2} = 6 \text{ Kgm}, m_{He} = 6 \text{ Kgm}, T_D = 236.5 \text{ K}.$$

Consideraciones finales, después de sacar el tope y en el equilibrio:

Donde:

$$P_{fc} = P_{fD}, W_c = -W_D$$

$$W_c = m_c R_c (T_{fc} - T_c) / (1-K);$$

$$W_D = m_D R_D (T_{fD} - T_D) / (1-K)$$

Además se sabe que las relaciones de las temperaturas con las presiones es:

$$\frac{T_c}{T_{fc}} = \left(\frac{P_c}{P_{fc}}\right)^{\frac{k-1}{k}}, \quad \frac{T_D}{T_{fD}} = \left(\frac{P_D}{P_{fD}}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

Se pide, evaluar: T_{fc} , T_{fD} , P_{fc} , P_{fD} .

Solución:

De las mezclas en cada lado del cilindro, se obtiene:

$$C_{pmc} = 3.0571 \text{ KJ/Kg-K},$$

$$C_{vmc} = 1.8887 \text{ KJ/Kg-K}; K_{mc} = 1.6186$$

$$R_{mc} = 1.16843 \text{ KJ/Kg-K}.$$

$$C_{p_mD} = 3.1171 \text{ KJ/Kg-K},$$

$$C_{vmD} = 1.9302 \text{ KJ/Kg-K}; K_{mD} = 1.6149$$

$$R_{mD} = 1.186915 \text{ KJ/Kg-K}.$$

De los trabajos: $m_c(T_{fc} - T_c) + m_D(T_{fD} - T_D) = 0$

y con

$$\frac{P_c}{P_D} = \frac{T_c \left(\frac{K_m}{K_m - 1}\right)_c \cdot T_{fD} \left(\frac{K_m}{K_m - 1}\right)_D}{T_D \left(\frac{K_m}{K_m - 1}\right)_D \cdot T_{fc} \left(\frac{K_m}{K_m - 1}\right)_c}$$

De donde :

$$T_{fd} = \left[\frac{P_c}{P_D} \cdot \frac{T_D \left(\frac{K_m}{K_m-1}\right)^D \cdot T_{fc} \left(\frac{K_m}{K_m-1}\right)^C}{T_C \left(\frac{K_m}{K_m-1}\right)^C} \right] \left(\frac{K_m-1}{K_m}\right)^D$$

Reemplazando: $P_c/P_D = 2.27$

$$m_c \cdot T_{fc} + m_D \left[\frac{P_c}{P_D} \cdot \frac{T_D \left(\frac{K_m}{K_m-1}\right)^D \cdot T_{fc} \left(\frac{K_m}{K_m-1}\right)^C}{T_C \left(\frac{K_m}{K_m-1}\right)^C} \right] \left(\frac{K_m-1}{K_m}\right)^D = m_c \cdot T_c + m_D \cdot T_D$$

$$5 \cdot T_{ic} + 12 [0.4816 T_{ic}^{2.6166}]^{0.3808} = 5020.5$$

Después de varios tanteos, asumiendo

$$T_{ic} = 361.25 \text{ K.}$$

$$\therefore 5019.55 \neq 5020.5$$

Aquí puede quedar o sino hacer un ligero ajuste.

Luego:

$$P_{fc} = \frac{64.94}{(436.5 / 361.25)^{\frac{1.6186}{0.6186}}} = 39.58 \text{ ba}$$

y;

$$T_{fd} = \left[2.27 \cdot 236.5^{\frac{1.6149}{0.6149}} \cdot \left(\frac{361.25}{436.5}\right)^{\frac{1.6186}{0.6186}} \right]^{\frac{0.6149}{1.6149}} = 267.76 \text{ K.}$$

$$P_{fd} = \frac{28.59}{\left(\frac{236.5}{267.76}\right)^{\frac{1.6149}{0.6149}}} = 39.61 \text{ ba.}$$

PROBLEMA 3.3

Para el gas natural cuya composición en términos de porcentaje de volumen es CH_4 , 60.1%; C_2H_6 , 14.8; C_3H_8 , 13.4; C_4H_{10} , 4.2; y N_2 , 7.5, evaluar: el análisis en términos de porcentaje de masa, M, R, C_p , C_v , y K de la mezcla, las presiones

parciales de cada uno de los componentes en bares, si la presión total de la mezcla es de 1 bar.

Solución:

ANALISIS EN % DE MASA:

COMP	% VOL.	MOL.FRAC*M.	MASA (Kg/KMOL.MEZ)	% MASA
CH ₄	60.10	0.601*16.040	9.64	39.28
C ₂ H ₆	14.80	0.148*30.070	4.45	18.13
C ₃ H ₈	13.40	0.134*44.097	5.91	24.08
C ₄ H ₁₀	4.20	0.042*58.124	2.44	9.94
N ₂	7.50	0.075*28.013	2.10	8.56
			<hr/> 24.54	<hr/> 99.99

Entonces:

$$M_m = 24.54/1 = 24.54 \text{ Kg/Kmol};$$

$$R_m = 8.3143/24.54 = 0.3388 \text{ KJ/Kg-K.}$$

$$C_{pm} = 0.3928*2.2537 + 0.1813*1.7662 + 0.2408*1.6794 + 0.0994*1.7164 + 0.0856*1.0416$$

$$\therefore C_{pm} = 1.8697 \text{ KJ/Kg-K}$$

$$C_{vm} = 0.3928*1.7354 + 0.1813*1.4897 + 0.2408*1.4909 + 0.0994*1.57347 + 0.0856*0.7448$$

$$\therefore C_{vm} = 1.5310 \text{ KJ/Kg-K}$$

$$K_m = 1.8697/1.5310 = 1.2212$$

y finalmente:

$$p(\text{CH}_4) = 1*0.601 = 0.601 \text{ bar.}$$

$$p(\text{C}_2\text{H}_6) = 1*0.148 = 0.148 \text{ bar.}$$

$$p(\text{C}_3\text{H}_8) = 1*0.134 = 0.134 \text{ bar.}$$

$$p(\text{C}_4\text{H}_{10}) = 1*0.042 = 0.042 \text{ bar.}$$

$$p(\text{N}_2) = 1*0.075 = 0.075 \text{ bar.}$$

$$1.000 \text{ bar.}$$

PROBLEMA 3.4

Se tiene tres depósitos iguales conectados por pequeñas tuberías de volumen despreciable y sus llaves correspondientes. El conjunto adiabático y en cada uno de ellos hay: 1 Kgm de N_2 a 50 °C, 1 Kgm de CH_4 a 30 °C, y 1 Kgm de CO a 40 °C. Si luego las llaves se abren y se mezclan todos los gases de modo que la variación de la energía interna total de la mezcla sea igual a cero, se pide:

- Evaluar la temperatura de la mezcla.
- Realizar c_p , c_v , M , y R , de la mezcla.
- Realizar el análisis en % de masa, y en % de volumen.

Solución:

- El esquema técnico sería el siguiente:

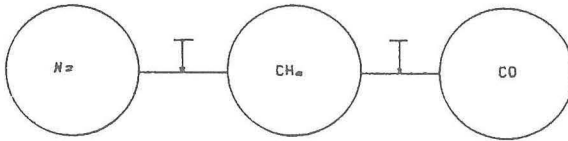


FIG. 3.3

$$dU = 0$$

$$\therefore t_m = \frac{m_x \cdot C_{vx} \cdot t_x + m_y \cdot C_{vy} \cdot t_y + m_z \cdot C_{vz} \cdot t_z}{m_x \cdot C_{vx} + m_y \cdot C_{vy} + m_z \cdot C_{vz}}$$

Reemplazando:

$$t_m = \frac{1 * 0.7448 * 50 + 1 * 1.7354 * 30 + 1 * 0.7445 * 40}{1 * 0.7448 + 1 * 1.7354 + 1 * 0.7445}$$

$$\therefore t_m = 36.92 \text{ °C}$$

-

$$\begin{aligned} C_{pm} &= \frac{1}{3} * 1.0416 + \frac{1}{3} * 2.2537 + \frac{1}{3} * 1.0416 \\ &= 1.4456 \text{ KJ/Kg-K} \end{aligned}$$

$$C_{VM} = \frac{1}{3} * 0.7448 + \frac{1}{3} * 1.7354 + \frac{1}{3} * 0.7445$$

$$= 1.0749 \text{ KJ/Kg-K}$$

$$K_m = 1.4456/1.0749 = 1.3449;$$

$$R_m = 0.37066 \text{ KJ/Kg-K}$$

$$M_m = 8.3143/0.37066 = 22.4311 \text{ Kgm/KMOL}$$

c) % VOLUMEN: $N_2 = 26.70$, $CH_4 = 46.60$;

$$CO = 26.70$$

% MASA: $N_2 = 33.33$, $CH_4 = 33.33$,

$$CO = 33.33$$

PROBLEMA 3.5

La mezcla de gases ideales:

$6CO_2 + 13H_2O + 47N_2$, se expande de 90 bares a 5 bares y 973 K. Si C_p y C_v de cada componente son función de la temperatura, cuál será la temperatura inicial si:

$$T_i/T_f = (p_i/p_f)^{(K-1/K)}$$

Solución:

De la mezcla: $6CO_2 + 13H_2O + 47N_2$

y con:

$$T_i = 973 (18)^{\frac{K_m-1}{K_m}}$$

De tablas:

$$\bar{C}_{p_{CO_2}} = -3.7357 + 30.529\theta^{0.5} - 4.1034\theta + 0.024198\theta^2$$

$$\bar{C}_{p_{H_2O}} = 143.05 - 183.54\theta^{0.25} + 82.751\theta^{0.5} - 3.6989\theta$$

$$\bar{C}_{p_{N_2}} = 39.06 - 512.79\theta^{0.5} - 1072.7\theta^2 - 820.4\theta^3$$

Asumiendo: $T_i = 1807.5 \text{ K}$;

$$\theta = (973 + 1807.5) / 200 = 13.9025$$

$$\therefore \overline{C}_{pm} = 38.7674 \frac{\text{KJ}}{\text{JMOL-K}}; \overline{C}_{vm} = 30.4531 \frac{\text{KJ}}{\text{JMOL-K}};$$

$$K_m = 1.2730$$

$$\therefore T_i = 1808.5 \text{ K} \neq 1807.5 \text{ K}.$$

*Se puede hacer un ligero ajuste y se obtiene el valor exacto.

PARTE IV

4. LA PRIMERA LEY DE LA TERMODINAMICA PARA PROCESOS Y CICLOS CUASIESTATICOS REVERSIBLES

4.1 ENUNCIADO DE LA PRIMERA LEY:

Lo enunció por primera vez MAYER, posteriormente JOULE demostró experimentalmente el equivalente mecánico del calor.

La definición más exacta se debe a Clausius: “La energía no se crea ni se destruye, solo se transforma”.

Las conclusiones más importantes que podemos obtener de este sencillo enunciado son:

4.1.1 INDICA EL NEXO CUANTITATIVO ENTRE LAS DIFERENTES FORMAS DE ENERGÍA.

Según el sistema termodinámico se establece que:

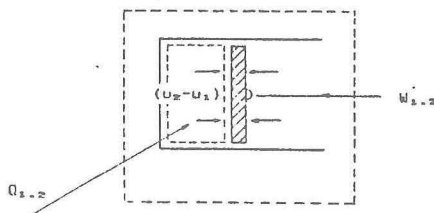


FIG. 4.1

ENERGIA
SUMINISTRADA =
AL SISTEMA

CAMBIO DE ENERGIA
PRESENTE EN EL +
SISTEMA

ENERGIA EVACUADA
POR EL SISTEMA
AL AMBIENTE

$$Q_{1,2} = (U_2 - U_1) + W_{1,2}$$

La demostración matemática podemos hacerla con la ayuda del experimento de JOULE:

Consideremos el siguiente esquema técnico:

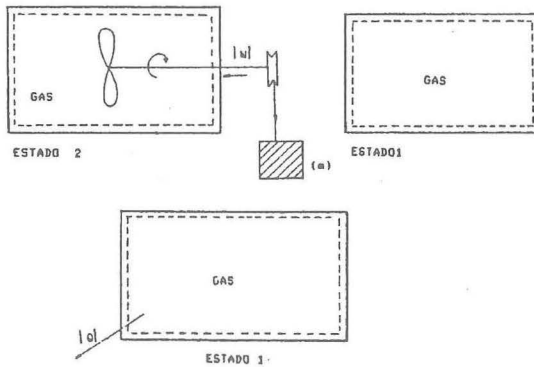


FIG. 4.2

- Trabajo $|W|$ se ha hecho sobre el sistema gas, debido al desplazamiento del peso (m) y con ello el giro de las paletas (estado-2). Proceso (1-2).
- El sistema gas puede regresar a su estado inicial (1), transfiriendo calor $|Q|$ al ambiente. Proceso (2-1).
- Como el trabajo $|W|$ y el calor $|Q|$ fueron medidos para una gran variedad de gases, se encontró que para el ciclo realizado se cumplía que:

$$\oint dQ = \oint dW$$

Es decir,

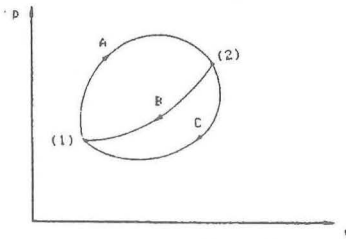


FIG. 4.3

$$\int_{1(A)}^2 \dot{d}Q + \int_{2(B)}^1 \dot{d}Q = \int_{1(A)}^2 \dot{d}W + \int_{2(B)}^1 \dot{d}W \dots (\alpha)$$

$$\int_{1(A)}^2 \dot{d}Q + \int_{2(C)}^1 \dot{d}Q = \int_{1(A)}^2 \dot{d}W + \int_{2(C)}^1 \dot{d}W \dots (\beta)$$

Restando $(\alpha) - (\beta)$:

$$\int_{2(B)}^1 \dot{d}Q - \int_{2(C)}^1 \dot{d}Q = \int_{2(B)}^1 \dot{d}W - \int_{2(C)}^1 \dot{d}W$$

$$\int_{2(B)}^1 (\dot{d}Q - \dot{d}W) = \int_{2(C)}^1 (\dot{d}Q - \dot{d}W)$$

En donde se ve que:

$$(\dot{d}Q - \dot{d}W)$$

es lo mismo para cualquier cambio de estado y por lo tanto sólo depende del estado inicial y del estado final, por lo que podemos expresarlo:

$$\dot{d}Q - \dot{d}W = \dot{d}E$$

donde $E = U + E_c + E_p$, representa toda la energía del sistema gas en el estado dado.

$$\dot{d}E = \dot{d}U + \dot{d}E_c + \dot{d}E_p$$

$$\therefore \dot{d}Q - \dot{d}W = \dot{d}U + \dot{d}E_c + \dot{d}E_p$$

$$\dot{d}Q = \dot{d}U + \dot{d}W + \dot{d}E_c + \dot{d}E_p$$

despreciando las energías cinéticas y potenciales, se obtiene $\dot{d}Q = \dot{d}U + \dot{d}W$

Es decir que: $Q_{1,2} = (U_2 - U_1) + W_{1,2}$

4.1.2 Es imposible construir un mecanismo con el cual se obtenga trabajo de la nada, y por eso no existe ningún móvil perpetuo; ver los siguientes ejemplos:

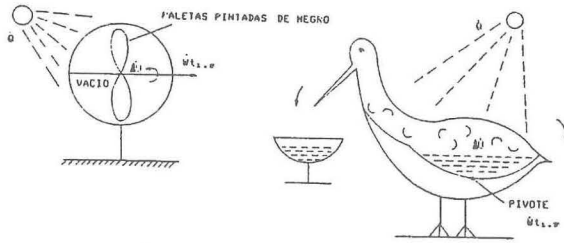


FIG. 4.4

En ambos mecanismos, siempre se cumplirá la conclusión 4.1.1. Es decir:

$$Q_{1,2} = (U_2 - U_1) + W_{1,2}$$

4.1.3 No determina la dirección en que tiene lugar el proceso o cambio de estado, y se puede aplicar tanto a procesos reversibles como irreversibles.

4.2 PROCESO CUASIESTATICO REVERSIBLE

Es aquel del cual se puede obtener trabajo máximo (expansión) o hacer trabajo mínimo (compresión), ya que en ambos casos no existe el calor de fricción ni el calor de disipación.

4.3 ECUACIONES DE ENERGIA PARA PROCESOS CUASIESTATICOS REVERSIBLES EN SISTEMAS CERRADOS

Consideremos el caso de una expansión de un portador de energía gaseoso en un cilindro-pistón, tal como indica la figura siguiente:

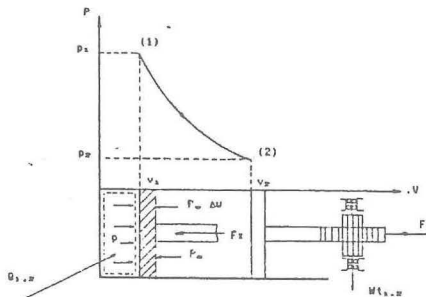


FIG. 4.5

4.3.1 ECUACION DE ENERGIA PARA EL PORTADOR DE ENERGIA

Aplicando la 1ª ley:

EN. SUMI. = CAMB. EN. SIST. CONSIDERADO + EN. EVAC

$$Q_{1,2} = (U_2 - U_1) + \int_1^2 PdV$$

4.3.2 ECUACION DE ENERGIA PARA EL SISTEMA ENTERO

$$Q_{1,2} = (U_2 - U_1) + \int_1^2 P_o dV + \int_1^2 \frac{Fx}{A} dV$$

4.3.3 ECUACION DE LA TRANSFERENCIA DE ENERGIA

$$\int_1^2 PdV = W_{11,2} + \int_1^2 P_o dV$$

4.4 ECUACIONES DE ENERGIA PARA PROCESOS CUASISTATICOS REVERSIBLES EN SISTEMAS ABIERTOS

A este proceso en sistemas abiertos se le denomina proceso de flujo estable estado estable (STEADY STATE STEADY FLOW PROCESS-SSSF).

Consideremos el esquema técnico que muestra la figura siguiente:

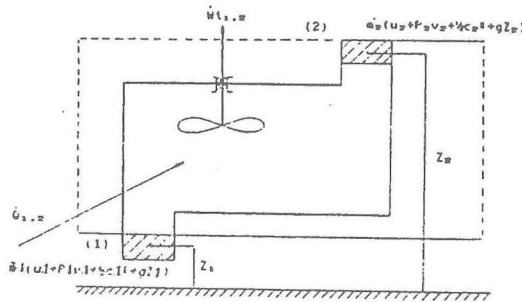


FIG. 4.6

Debe considerarse que:

- El sistema entero debe ser estacionario (las magnitudes de estado no varían con el tiempo).
- Los flujos de masa son constantes: $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$.
- Los valores de las temperaturas y de las velocidades a la entrada y a la salida son valores promedios.

4.4.1 ECUACION DE ENERGIA PARA EL PORTADOR DE ENERGIA

DE 1ª ley:

$$\dot{Q}_{1,2} = \dot{m} (h_2 - h_1) - \int_1^2 \dot{V} dp$$

4.4.2 ECUACION DE ENERGIA PARA EL SISTEMA ENTERO

De 1ª ley:

EN.SUM. = $\Delta U(\text{SIST. CONS.}) + \text{EN. EVACUADA.}$

$\therefore \text{EN.SUM} = \text{EN. EVAC.}$

$$\dot{Q}_{1,2} + \dot{m}_1(u_1 + p_1 v_1 + 1/2 c_1^2 + g z_1) = \dot{W}_{11,2} + \dot{m}_2(u_2 + p_2 v_2 + 1/2 c_2^2 + g z_2)$$

$$\therefore \dot{Q}_{1,2} = \dot{m}[(h_2 - h_1) + 1/2 (c_2^2 - c_1^2) + g(z_2 - z_1)] + \dot{W}_{11,2}$$

4.4.3 ECUACION DE LA TRANSFERENCIA DE ENERGIA

$$- \int_1^2 \dot{V} dp = \dot{W} I.2 + 1/2 \dot{m} (C_2^2 - C_1^2) + \dot{m}.g (z_2 - z_1)$$

Estos procesos se dan generalmente en máquinas como: calderas de vapor, turbinas de gas y de vapor, compresores de aire, bombas de agua, etc, etc.

La aplicación de las ecuaciones es de modo general, para portadores de energía ideales y reales.

4.5 LA REDUCCIÓN ADIABÁTICA DE UNA CORRIENTE ESTACIONARIA Y EL COEFICIENTE JOULE-THOMPSON.

4.5.1 LA REDUCCIÓN ADIABÁTICA

Estos procesos de reducción adiabática generalmente suceden en dispositivos tales como: llaves de agua, de vapor, orificios, bridas, válvulas de estrangulamiento, etc, etc., las cuales se intercalan en procesos por donde circulan portadores de energía: líquidos, vapores o gases.

Analizamos el caso de una brida, al interior de una tubería, tal como indica el esquema técnico de la figura siguiente:

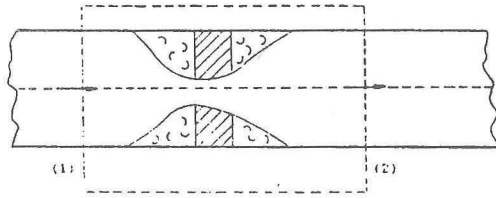


FIG. 4.7.

De la ecuación de energía para el sistema entero:

$$q_{1,2} = (h_2 - h_1) + 1/2 (c_2^2 - c_1^2) + g(z_2 - z_1) + w_{11,2}$$

donde: $q_{1,2} = 0$, $w_{11,2} = 0$,
 $c_1 = c_2$, $z_2 = z_1$

$$\therefore h_2 - h_1 = 0$$

$$h_1 = h_2 = \text{constante}$$

El proceso es isentálpico o a entalpía constante.

4.5.2 EL COEFICIENTE JOULE-THOMPSON

Tomemos la función: $T = f(p, h)$

$$dT = (\partial T / \partial p)_h dp + (\partial T / \partial h)_p dh \dots (\alpha)$$

También de: $p = f(T, h)$

$$dp = (\partial p / \partial T)_h dT + (\partial p / \partial h)_T dh \dots (\beta)$$

Reemplazando (β) en (α) :

$$dT = (\partial T / \partial p)_h [(\partial p / \partial T)_h dT + (\partial p / \partial h)_T dh] + (\partial T / \partial h)_p dh$$

efectuando y ordenando:

$$dT = (\partial T / \partial p)_h (\partial p / \partial T)_h dT + [(\partial T / \partial p)_h (\partial p / \partial h)_T + (\partial T / \partial h)_p] dh$$

Si, $dh = 0$ y $dT \neq 0$

$$\therefore dT = (\partial T / \partial p)_h (\partial p / \partial T)_h dT$$

$$\therefore (\partial T / \partial p)_h (\partial p / \partial T)_h = 1$$

Si; $dT = 0$ y $dh \neq 0$

$$\begin{aligned} \therefore (\partial T / \partial p)_h \cdot (\partial p / \partial h)_T + (\partial T / \partial h)_p &= 0 \\ (\partial T / \partial p)_h \cdot (\partial p / \partial h)_T &= -(\partial T / \partial h)_p \\ (\partial T / \partial p)_h \cdot (\partial p / \partial h)_T \cdot (\partial h / \partial T)_p &= -1 \end{aligned}$$

Aquí reemplazamos: $(\partial h / \partial T)_p = C_p$; y $(\partial h / \partial p)_T = v - T(\partial v / \partial T)_p$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h = \frac{-1}{\left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p} \cdot \left(\frac{\partial h}{\partial p} \right)_T$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h = \frac{1}{C_p} \left[T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v \right] = \mu_j$$

que viene a ser la expresión del coeficiente diferencial JOULE-THOMPSON (μ_j), el cual se puede cambiar por:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h = \frac{T}{C_p} \left[\left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - \frac{v}{T} \right] = \mu_j$$

para hacer el siguiente análisis:

- Si $(\partial v / \partial T)_p = v / T$; $\mu_j = 0$ es decir que para un gas ideal no hay cambio en la temperatura.
- Si $(\partial v / \partial T)_p < v / T$; $\mu_j < 0$, es decir negativo, por lo cual la temperatura aumenta y por consiguiente hay un calentamiento.
- Si $(\partial v / \partial T)_p > v / T$; $\mu_j > 0$, es decir positivo, por lo cual la temperatura disminuye y por consiguiente hay un enfriamiento.
- Por eso es que el efecto JOULE-THOMPSON, sólo puede ser observado con gases y líquidos reales.

Ahora veamos la obtención experimental de este coeficiente:

Consideremos el siguiente proceso isentálpico:

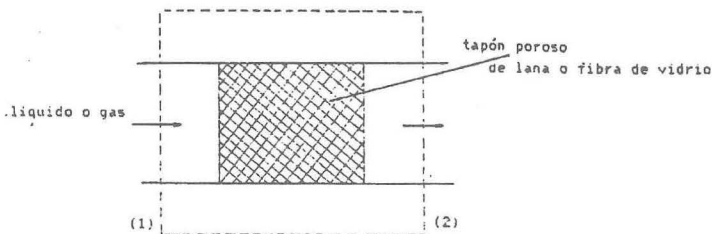


FIG. 4.8

- p_1 y t_1 , a la entrada se mantienen constantes.
- Se expande en forma continua a través del tapón.
- p_2 y t_2 , corriente abajo se registran con valores diferentes y sucesivos.
- En cada punto la entalpía siempre es h_1 y con varios puntos se puede trazar una isentálpica.
- La pendiente es el coeficiente JOULE-THOMPSON.

Es decir:

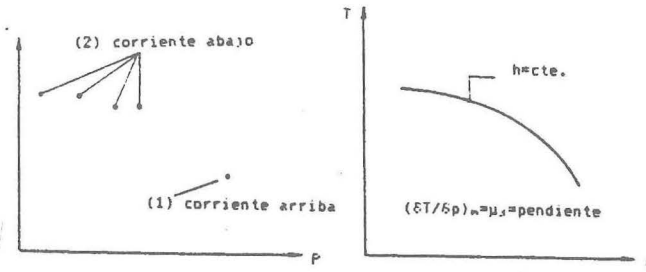


FIG. 4.9

- Haciendo variar los valores de p_1 y t_1 en forma repetitiva como en el caso anteriormente explicado, se construyen varias isentálpicas:

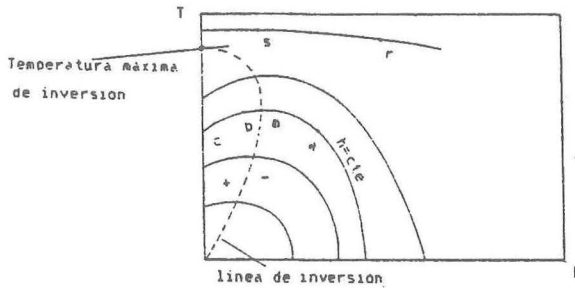


FIG. 4.10

- Se utiliza en refrigeración sólo cuando la temperatura inicial es más baja que la temperatura máxima de inversión (a-c), por ejemplo.
- En cambio en (r-s), no es posible utilizarlo, no importa cuan baja sea su presión.
- En la tabla que sigue se da las temperaturas máximas de inversión de algunos portadores de energía:

GAS	TEMP. MAX. INVERSION(°F, °C)
ARGON	8 42 ————— 450
AIRE	628 ————— 331.11
HELIO - 415 y	-350 ————— - 248.33 Y -212.22
HIDROGENO	-96 ————— -71.11
NITROGENO	659 ————— 348.33

Se puede integrar el coeficiente diferencial y obtener, el coeficiente integral:

$$\mu_j = (T_2 - T_1) / (P_2 - P_1)$$

μ_j , se puede medir más directamente que otras propiedades.

4.6 LA ECUACION DE ENERGIA PARA UN VOLUMEN DE CONTROL CON VARIACION DE MASA.

A este proceso se le denomina proceso de flujo UNIFORME Y ESTADO UNIFORME (UNIFORM STATE UNIFORM FLOW PROCESS-USUF).

Se dan generalmente en tanques o depósitos con línea de entrada y sin salida, o con línea de salida pero sin entrada; o en forma más general con líneas de entrada y salida, pero siempre al interior del sistema o volumen de control puede variar la masa.

Por lo tanto consideremos el esquema técnico que muestra la figura siguiente:

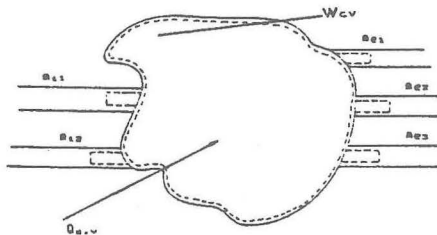


FIG. 4.11

Podemos aplicar la 1ª ley en forma general:

EN.SUM. = CAMBIO EN.SIST.PRESENTE + EN.EVACUADA.

$$Q_{c.v} + \sum m_i (h_i + \frac{1}{2} C_1^2 + gz_i) = W_{c.v} + \sum m_e (h_e + \frac{1}{2} c_e^2 + gz_e) \\ + [m_2 (u_2 + \frac{1}{2} C_2^2 + gz_2) - m_1 (u_1 + \frac{1}{2} C_1^2 + gz_1)] c.v$$

y el balance de masas complementará a la expresión de la ecuación de energía anterior:

$$\sum m_i = \sum m_e + (m_2 - m_1) c.v \\ \text{ó; } \sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e + \frac{dm_{c.v}}{dt}$$

4.7 DERIVACION DEL PROCESO POLITROPICO GENERAL (EL POLITROPO).

4.7.1 *POLITROPO*.- Es el cambio de estado cuasiestático reversible que satisface a un calor específico general constante (c).

De la ecuación de energía para el portador de energía podemos escribir:

$$\dagger dq = c_v dT + pdv = cdT \\ pdv = (c - c_v).dT;$$

pero $pv = R.T$, después de diferenciarlo se obtiene: $dT = (pdv + vdp)/R$ reemplazando:

$$pdv = (c - c_v) \left(\frac{pdv + vdp}{C_p - C_v} \right) \\ \left(1 - \frac{C - C_v}{C_p - C_v} \right) pdv = \left(\frac{C - C_v}{C_p - C_v} \right) vdp \\ \left(\frac{C_p - C_v - C + C_v}{C_p - C_v} \right) pdv = \left(\frac{C - C_v}{C_p - C_v} \right) vdp \\ vdp + \left(\frac{C - C_p}{C - C_v} \right) pdv = 0$$

llamando a $(c - c_p)/(c - c_v) = n$

$$\therefore vdp + npdv = 0;$$

dividiendo por $v \cdot p$ m.a.m.

$$(dp/p) + n \cdot (dv/v) = 0$$

$$d \ln P + d \ln v = dC$$

$$d \ln(p \cdot v^n) = dC;$$

levantando el diferencial:

$$pv^n = C$$

Para un cambio de estado (1-2):

$$p_1 v_1^n = p_2 v_2^n \text{ y con } p \cdot v = R \cdot T;$$

$$v_1 = R \cdot T_1 / p_1; v_2 = R T_2 / p_2;$$

se obtiene:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1}$$

Que son las denominadas ECUACIONES DE POISSON:

Graficando el politropo se debe distinguir entre el politropo verdadero o real y el politropo promedio (n).

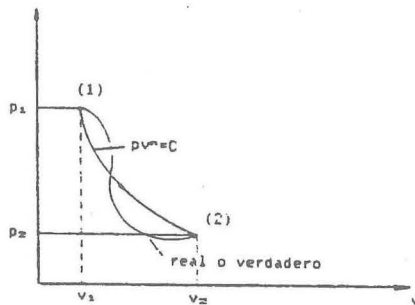


FIG. 4.12

4.7.2 Con las ecuaciones de Poisson y de estado $pv = RT$, se puede evaluar todas las magnitudes de estado: p_1, v_1, t_1 ; y p_2, v_2, t_2 .

4.7.3 El trabajo de cambio de volumen también se evalúa considerando que:

$$W_{v1,2} = \int_1^2 p dv; \text{ con } pv^n = C; p = \frac{C}{V^n}$$

Luego;

$$W_{v1.2} = C \int_1^2 \frac{dv}{V^n} = C \int_1^2 v^{-n} \cdot dv = C \cdot \frac{v^{-n+1}}{-n+1} \Big|_{v_1}^{v_2}$$

$$W_{v1.2} = C \left(\frac{v_2^{-n+1} - v_1^{-n+1}}{-n+1} \right);$$

$$\text{pero como: } C = P_1 v_1^n = P_2 v_2^n$$

$$\therefore W_{v1.2} = \frac{P_2 v_2^n \cdot v_2^{-n+1} - P_1 v_1^n v_1^{-n+1}}{1-n} = \frac{P_2 v_2 - P_1 v_1}{1-n}$$

$$W_{v1.2} = \frac{P_2 v_2 - P_1 v_1}{1-n} = \frac{R(T_2 - T_1)}{1-n}$$

4.7.4 El calor suministrado o evacuado se evalúa a partir de la ecuación de energía para el portador de energía:

$$q_{1.2} = C_v (T_2 - T_1) + \int_1^2 p dv = C_v (T_2 - T_1) + \frac{P_2 v_2 - P_1 v_1}{1-n}$$

pero con $p \cdot v = R \cdot T$

$$q_{1.2} = \frac{C_v}{R} (P_2 v_2 - P_1 v_1) + \frac{P_2 v_2 - P_1 v_1}{1-n}$$

$$q_{1.2} = \left(\frac{C_v}{c_p - c_v} + \frac{1}{1-n} \right) (P_2 v_2 - P_1 v_1);$$

$$q_{1.2} = \frac{(c_v - n c_v + c_p - c_v)}{(c_p - c_v) (1-n)} \cdot \frac{(P_2 v_2 - P_1 v_1)}{P_2 v_2};$$

div. n. y d. por c_v

$$\therefore q_{1.2} = \left(\frac{K - n}{K - 1} \right) \cdot \frac{(P_2 v_2 - P_1 v_1)}{1 - n}$$

$$q_{1.2} = \left(\frac{K - n}{K - 1} \right) \cdot w_{v1.2}$$

4.7.5 RELACION ENTRE:

$$\int_1^2 p dv \text{ y } \int_1^2 v dp$$

$$\text{De: } - \int_1^2 v dp \text{ y } pv^n = C; v = \left(\frac{C}{p}\right)^{\frac{1}{n}}$$

$$\text{Entonces: } - \int_1^2 v dp = - \int_1^2 C^{\frac{1}{n}} \cdot \frac{dp}{p^{\frac{1}{n}}} = - \int_1^2 C^{\frac{1}{n}} \cdot p^{-\frac{1}{n}} \cdot dp$$

$$- \int_1^2 v dp = - C^{\frac{1}{n}} \cdot \frac{p^{-\frac{1}{n}+1}}{-\frac{1}{n}+1} \Big|_{p_1}^{p_2} = - C^{\frac{1}{n}} \cdot \frac{(p_2^{-\frac{1}{n}+1} - p_1^{-\frac{1}{n}+1})}{-\frac{1}{n}+1}$$

$$\text{Pero como: } p_1 v_1^n = p_2 v_2^n = C$$

$$\therefore p_1^{1/n} \cdot v_1 = p_2^{1/n} \cdot v_2 = C^{1/n}$$

$$- \int_1^2 v dp = - \frac{[p_2^{\frac{1}{n}} \cdot v_2 \cdot p_2^{-\frac{1}{n}+1} - p_1^{\frac{1}{n}} \cdot v_1 \cdot p_1^{-\frac{1}{n}+1}]}{n-1} \cdot n = \frac{n(p_2 v_2 - p_1 v_1)}{1-n}$$

$$\therefore - \int_1^2 v dp = n \int_1^2 p dv$$

4.8 PROCESOS POLITROPOS ESPECIALES

Teóricamente n puede tomar cualquier valor comprendido entre $-\infty$ y $+\infty$.

4.8.1 PROCESO ADIABATICO REVERSIBLE

De la ecuación de energía para el portador de energía, tenemos:

$$q_{1,2} = (h_2 - h_1) - \int_1^2 v dp = c \int_1^2 dT$$

Por definición: $q_{1,2} = 0$;

$$c = \frac{0}{\int_1^2 dT} = 0$$

y como:

$$n = \frac{c - c_p}{c - c_v} = \frac{-c_p}{-c_v} = K$$

Entonces el polítopo especial se escribe:

$$p_1 v_1^k = p_2 v_2^k = C$$

En general:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1}$$

En el diagrama (p-v) será:

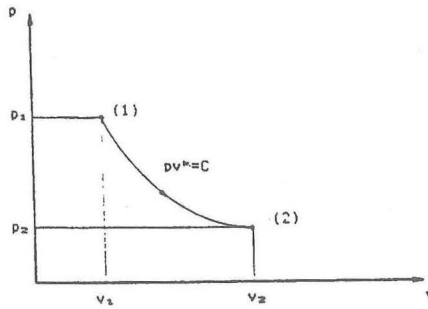


FIG. 4.13

4.8.2 PROCESO ISOCORO

De ecuación de energía para el portador de energía:

$$\dot{d}q_{1,2} = c_v dT + p dv = c dT;$$

como $v = c$; ó $dv = 0$

$$\therefore c_v dT = c dT$$

$$c = c_v$$

Entonces; de:

$$n = \frac{c - c_p}{c - c_v} ; n = \lim_{c \rightarrow c_v} \frac{c - c_p}{c - c_v} = \infty$$

En el diagrama (p-v) será:

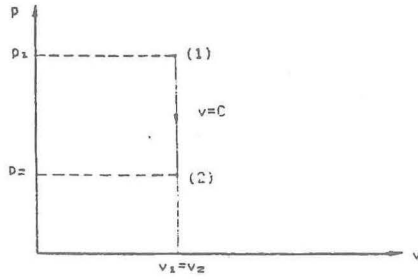


FIG. 4.14

4.8.3 PROCESO ISOBARICO

De ecuación de energía para el portador de energía:

$$\dot{d}q_{1,2} = cvdT + pdv = c_p dT - vdp = cdT$$

como $p = c$; $dp = 0$

$$\therefore c_p dT = cdT$$

$$c = c_p$$

Entonces de :

$$n = \frac{C - C_p}{C - C_v} ; n = \lim_{C \rightarrow C_p} \frac{C - C_p}{C - C_v} = 0$$

En el diagrama (p-v) será:

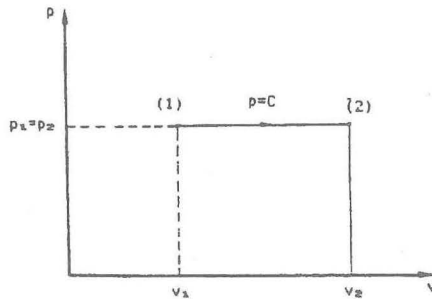


FIG. 4.15

4.8.4 PROCESO ISOTERMICO

De ecuación de energía para el portador de energía:

$$\begin{aligned} \dot{d}q_{1,2} &= c_v dT + p dv = c_p dT - v dp = c dT \\ \text{como } T &= C; dT = 0 \end{aligned}$$

$$\therefore c = \dot{d}q/dT = +\infty$$

Entonces de

$$n = \frac{c - c_p}{c - c_v}; n = \lim_{c \rightarrow +\infty} \left[\frac{1 - \frac{c_p}{c}}{1 - \frac{c_v}{c}} \right] = 1$$

Entonces el politropo especial se escribe:

$$p_1 v_1 = p_2 v_2 = C$$

En el diagrama (p-v) será:

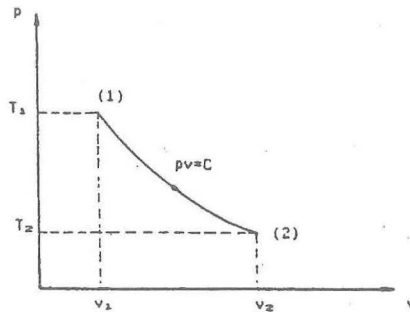


FIG. 4.16

Para este proceso podemos obtener el calor y el trabajo de la ecuación de energía para el portador de energía:

$$\begin{aligned} \dot{d}q &= du + p dv = c_v dT + p dv; \\ dT &= 0 \text{ y } p = RT/v \end{aligned}$$

$$\therefore \dot{d}q = p \cdot dv = R \cdot T \cdot \frac{dv}{v}; \text{ integrando:}$$

$$q_{1,2} = RT \ln v_2/v_1 = RT \ln p_1/p_2 = w_{v1,2}$$

Resumiendo, podemos representar los cuatro procesos en el diagrama (p-v)

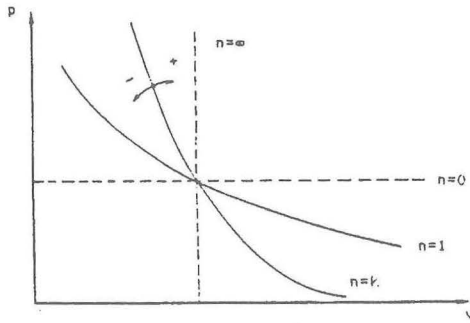


FIG. 4.17

Comparando los procesos isotérmico y adiabático, podemos darnos cuenta en que dirección se evacúa el calor, y en que dirección se añade o se suministra «+» calor.

4.9 LOS DIAGRAMAS DE ESTADO (T-s) Y (h-s) PARA GASES IDEALES

4.9.1 DIAGRAMA DE ESTADO (T-s)

Se puede concebir un diagrama considerando a la temperatura (T) y a la entropía (s) como variables independientes como ordenada y como abscisa, respectivamente.

En este diagrama entonces podemos ver con mayor claridad los procesos anteriormente estudiados y representados en el diagrama (p-v).

PROCESO ADIABATICO:

$$\text{De } \dagger dq = Tds = 0 = du + pdv = dh - vdp$$

$$\therefore ds = 0/T = 0; s_1 = s_2 = \text{constante}$$

Entonces en el diagrama (T-s) será:

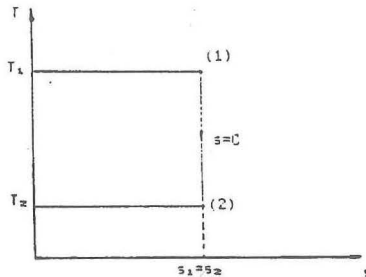


FIG. 4.18

PROCESO ISOTERMICO:

Como sabemos aquí; $T = C$; $dT = 0$; $T_1 = T_2$ y en el diagrama (T-s) será:

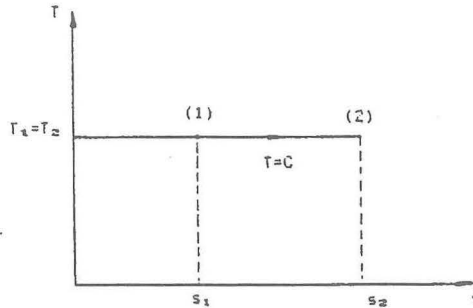


FIG. 4.19

Entonces el calor puede representarse como area $(s_1-1-2-s_2)$

Es decir: $q_{1,2} = T(s_2-s_1)$

PROCESO ISOBARICO:

Partiendo del polítopo general podemos escribir a partir de la ecuación de energía para el portador de energía:

$$\dot{q} = Tds = cdT \quad \therefore \quad ds = c.dT/T$$

Podemos fijar un estado de equilibrio de referencia (1) para el aire: $T_1 = 273 \text{ K}$,
 $p_1 = 1 \text{ bar}$; $v_1 = R.T_1/p_1 = 0.783 \text{ m}^3/\text{Kg}$.
 $s_1 = 0 \text{ KJ/Kg-K}$

y un estado de equilibrio arbitrario: T,s.

Entonces:

$$s - s_1 = c \ln \frac{T}{T_1}; \quad \frac{s - s_1}{C} = \ln \frac{T}{T_1}; \quad \frac{T}{T_1} = e^{\frac{s - s_1}{c}}$$

$$\therefore \quad T = T_1 \cdot e^{\frac{s - s_1}{c}}; \quad \text{y como } c = c_p = 1 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

y para valores de $s = 0.25, 0.50, \text{ etc., etc.}$, se obtiene:

$T = 350 \text{ K}, 450 \text{ K}, \text{ etc., etc.}$

Por lo que se puede graficar; el proceso isobárico:

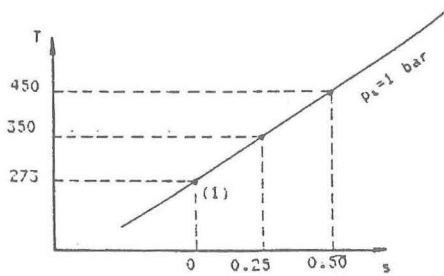


FIG. 4.20

PROCESO ISOCORO:

Para este proceso:

$$c = c_v = 0.713 \text{ KJ/KgK}$$

Entonces se obtiene: $T = 387.7 \text{ K}, 550.4 \text{ K}, \text{ etc.}$

Por lo que se puede graficar el proceso isócoro:

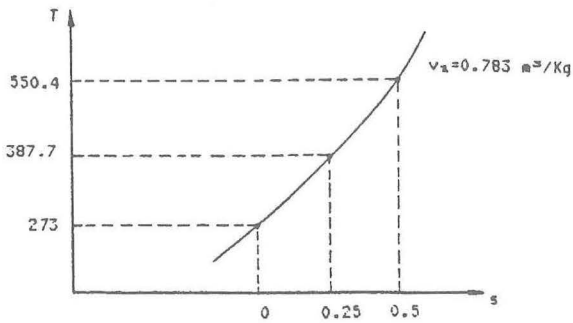


FIG. 4.21

Del mismo modo podemos graficar más isóbaras y más isócoras.

Dado que todas las isóbaras tienen los mismos coeficientes direccionales; de $Tds = cdT$

$$\therefore (\partial T/\partial s)_p = T/c_p$$

y dado que todas las isócoras también tienen los mismos coeficientes direccionales:

$$\therefore (\partial T/\partial s)_v = T/c_v$$

Se puede completar el diagrama, trazando paralelas solamente a la isóbara y a la isócara de referencia.

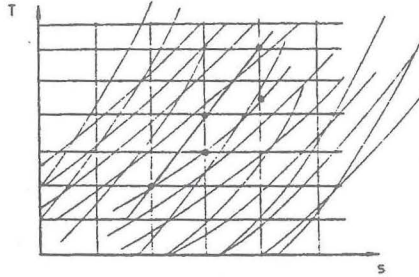


FIG. 4.22

4.9.2 DIAGRAMA DE ESTADO ($h-s$)

De la ecuación de energía para el portador de energía:
 $Tds = dh - vdp$; $dh = Tds + vdp$
 Es decir:

$$\left(\frac{\partial h}{\partial s}\right) = T + v \left(\frac{\partial p}{\partial s}\right) \dots\dots (\alpha)$$

Para un cambio de estado isotérmico y a partir de : $Tds = C_p dT - vdp$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial s}\right)_T = -\frac{T}{V} \dots\dots (\beta)$$

Reemplazando (β) en (α):

$$\left(\frac{\partial h}{\partial s}\right)_T = T + v \left(-\frac{T}{v}\right) = T - T = 0$$

Lo que quiere decir:

$$dh = 0 \quad \therefore \quad h = \text{cte.}$$

El eje de las entalpías, será paralelo al eje de las temperaturas, sólo que con otro dimensionamiento.

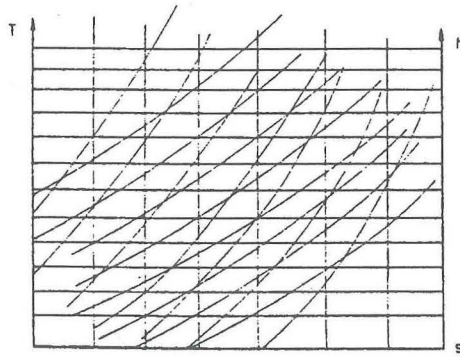


FIG.4.23

4.10 LAS ECUACIONES DE ENERGIA PAR LOS PROCESOS CICLICOS CUASIESTATICOS REVERSIBLES

Consideremos en el diagrama (p-v) un ciclo constituido por cinco cambios de estado:

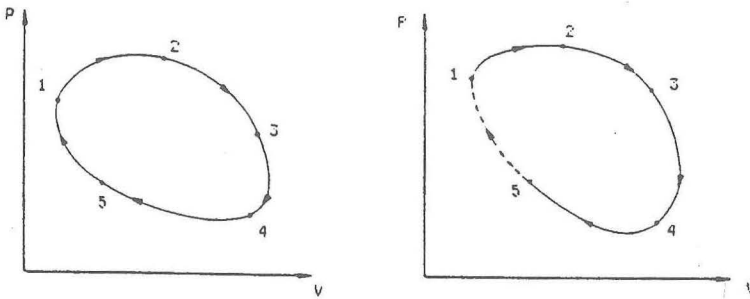


FIG. 4.24

4.10.1 ECUACION DE ENERGIA PARA EL PORTADOR DE ENERGIA

$$1 - 2 : Q_{1,2} = (U_2 - U_1) + \int_1^2 p dV = (H_2 - H_1) - \int_1^2 V dp ;$$

$$2 - 3 : Q_{2,3} = (U_3 - U_2) + \int_2^3 p dV = (H_3 - H_2) - \int_2^3 V dp ;$$

.

p144

$$\frac{5 - 1 : Q_{5,1} = (U_1 - U_5) + \int_5^1 p dV = (H_1 - H_5) - \int_5^1 V dp}{\sum Q_{i,n} = \sum W_{vi,n} = -\oint V dp}$$

4.10.2 ECUACION DE ENERGIA PARA EL SISTEMA ENTERO

$$1 - 2 : Q_{1,2} = (H_2 - H_1) + W_{1,2}$$

$$2 - 3 : Q_{2,3} = (H_3 - H_2) + W_{2,3}$$

: : :
: : :
: : :

$$5 - 1 : Q_{5,1} = (H_1 - H_5) + W_{r5,1}$$

$$\sum Q_{i,n} = \sum W_{ii,n}$$

4.10.3 ECUACION DE LA TRANSFERENCIA DE ENERGIA

$$\sum W_{ii,n} = \sum W_{vi,n} = \oint V dp$$

4.11 EL RENDIMIENTO TERMICO DE UN CICLO POSITIVO

Sea el ciclo positivo en el diagrama (P-V).

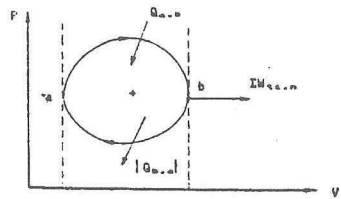


FIG. 4.25

Por definición:

$$\eta_{th} = \frac{\text{TRABAJO UTIL OBTENIDO}}{\text{CALOR SUMINISTRADO}} =$$

$$= \frac{\sum W_{ii,n}}{Q_{a,b}} = \frac{\sum Q_{i,n}}{Q_{a,b}} = \frac{\sum W_{vi,n}}{Q_{a,b}}$$

$$\text{ó } \eta_{th} = \frac{Q_{a,b} - |Q_{b,a}|}{Q_{a,b}} = 1 - \frac{|Q_{b,a}|}{Q_{a,b}}$$

4.12 EL COEFICIENTE DE PERFORMANCE DE UN CICLO NEGATIVO

Sea el ciclo negativo en el diagrama (P-V)

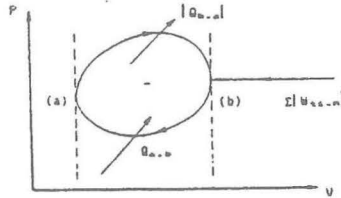


FIG. 4.26

Por definición:

$$\text{C.O.P.} = \frac{\text{CALOR SUMINISTRADO}}{\text{TRABAJO ÚTIL ABSOLUTO}} = \frac{Q_{a,b}}{\sum |W_{útil}|}$$

$$\text{Ó C.O.P.} = \frac{Q_{a,b}}{|Q_{b,a}| - Q_{a,b}} = \frac{1}{\frac{|Q_{b,a}|}{Q_{a,b}} - 1}$$

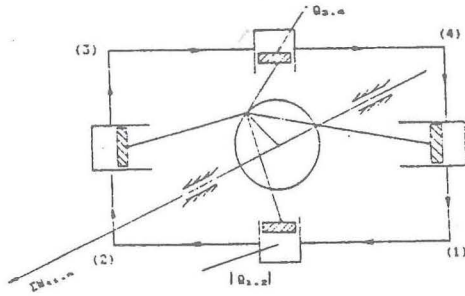
4.13 ANALISIS GENERAL DE LOS CICLOS TERMODINAMICOS .- CICLO DE CARNOT:

Analizar un ciclo termodinámico, involucra la evaluación de:

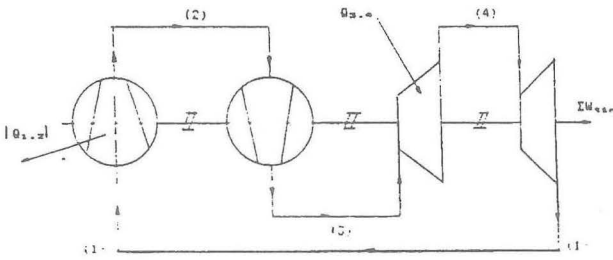
- Todas las magnitudes de estado en cada punto del ciclo.
- El calor suministrado al ciclo.
- El calor evacuado del ciclo.
- El trabajo útil o neto del ciclo.
- El rendimiento térmico o el coeficiente de performance del ciclo.
- La presión media efectiva del ciclo.
- La igualdad de Clausius.

Para ello hemos tomado como referencia el ciclo de CARNOT, cuya realización técnica puede ser con máquinas de pistón-cilindro-biela-manivela o con máquinas rotativas como compresores y turbinas.

Es decir:



CON MAQUINAS RECIPROCANES

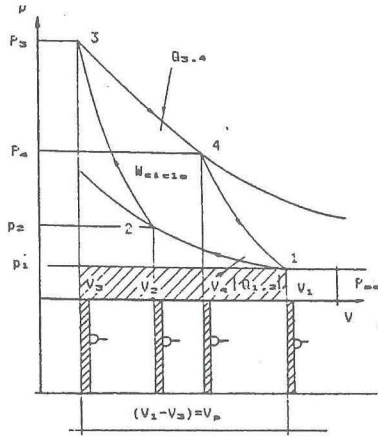


CON MAQUINAS ROTATIVAS

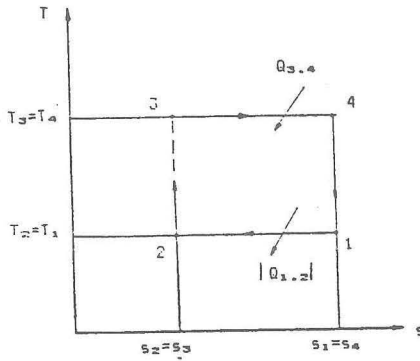
FIG 4.27

- 1-2: Compresión isotérmica con evacuación de calor $|Q_{1,2}|$
- 2-3 Compresión adiabática.
- 3-4 Expansión isotérmica con suministro de calor $Q_{3,4}$
- 4-1 Expansión adiabática.

Los diagramas (P-V) y (T-s) para el ciclo serán:



(a)



(b)

FIG. 4.28

4.13.1 Las magnitudes de estado pueden evaluarse en cada punto del ciclo con las ecuaciones de POISSON y la ecuación de estado:

$$\frac{T_a}{T_b} = \left(\frac{P_a}{P_b}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{V_b}{V_a}\right)^{\frac{k-1}{k}}; PV = m.R.T.$$

4.13.2 EL CALOR SUMINISTRADO:

$$Q_{3,4} = m.R.T_3 \ln \frac{V_4}{V_3}$$

4.13.3 EL CALOR EVACUADO:

$$|Q_{1,2}| = m.R.T_1 \ln \frac{V_1}{V_2}$$

4.13.4 EL TRABAJO ÚTIL OBTENIDO DEL CICLO

$$\sum W_{i,n} = \sum Q_{i,n} = Q_{3,4} - |Q_{1,2}|$$

4.13.5 EL RENDIMIENTO TÉRMICO DEL CICLO

$$\eta_{th} = \frac{\sum W_{i,n}}{Q_{3,4}} = \frac{Q_{3,4} - |Q_{1,2}|}{Q_{3,4}} = 1 - \frac{T_1}{T_3}$$

4.13.6 LA PRESIÓN MEDIA EFECTIVA:

El área en el diagrama (P-V) representa el trabajo del ciclo (W_{ciclo}); el cual será equivalente al área del rectángulo cuyos lados son la presión media efectiva (\bar{P}_{me}) y el volumen desplazado por el pistón $V_p = (V_1 - V_3)$.
Es decir:

$$W_{ciclo} = \bar{P}_{me} \times V_p$$

$$\therefore \bar{P}_{me} = \frac{W_{ciclo}}{V_p} = \frac{W_{ciclo}}{(V_1 - V_3)} \text{ N/m}_2$$

4.13.7 Para la igualdad de Clausius, debemos desarrollar primero la parte V o sea la 2ª Ley de la Termodinámica.

4.14 RENDIMIENTO DE UN REGENERADOR O DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR

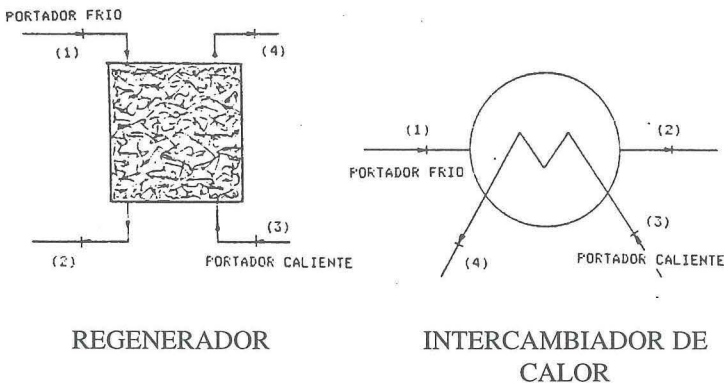


FIG. 4.29

Como ambos dispositivos se consideran adiabáticos, entonces se define el rendimiento como:

$$\eta_{R.O.I.C.} = \frac{\text{CALOR ABSORB. POR EL PORT. FRIO}}{\text{CALOR MAX. QUE ABSORBERIA EL P. FRIO}}$$

$$\eta_{R.O.I.C.} = \frac{(H_2 - H_1)}{(H_3 - H_1)} = \frac{m_{1,2} \times C_{p1,2} (T_2 - T_1)}{m_{1,2} \times C_{p1,2} (T_3 - T_1)} = \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_1}$$

Para que este rendimiento sea ideal, entonces:

$$\eta_{R.O.I.C.} = \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_1} = 1$$

$$\therefore T_2 = T_3$$

y del intercambio de calor:

$$Q_{1,2} = - Q_{3,4}$$

$$m_{1,2} \cdot C_{p1,2} (T_2 - T_1) = - m_{3,4} \cdot C_{p3,4} (T_4 - T_3)$$

$$\text{si; } m_{1,2} = m_{3,4}; \text{ y } C_{p1,2} = C_{p3,4}$$

$$\therefore T_2 - T_1 = - T_4 + T_3; \therefore T_1 = T_4$$

PARTE V

5. LA SEGUNDA LEY DE LA TERMODINAMICA PARA PROCESOS Y CICLOS CUASISTATICOS REVERSIBLES

5.1 ENUNCIADOS DE LA 2ª LEY

LORD KELVIN.- Calor no se puede transformar totalmente en trabajo, sin que al mismo tiempo una parte de éste, se evacúe a un recipiente de baja temperatura.

RECIPROCO.- Trabajo sí se puede transformar totalmente en calor «. Ejemplo, el trabajo de fricción $|W_w|$ en calor de fricción $|Q_w|$.

CLAUSIUS.- Es imposible transferir calor de un recipiente de baja temperatura hacia un recipiente de alta temperatura, a no ser que se suministre o realice trabajo desde el exterior.

RECIPROCO.- Calor sí se puede transferir por sí solo desde un recipiente de alta temperatura hacia un recipiente de baja temperatura.

Como se ve, se trata de transformaciones y transferencias, e indica cuales transformaciones son posibles y cuales no.

Esto también nos indica que tanto los ciclos positivos como los ciclos negativos, pueden desarrollarse entre recipientes de energía de alta temperatura y de baja temperatura.

O sea:

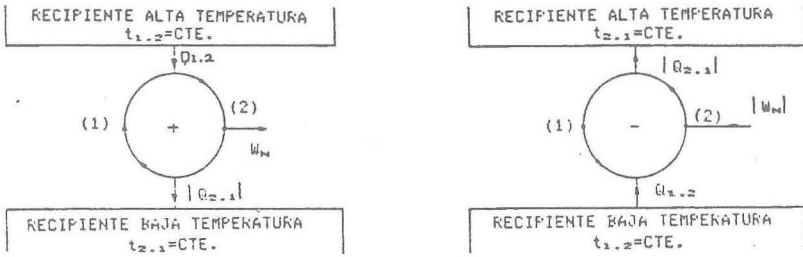


FIG. 5.1

5.2 LA SUMA DE LAS CANTIDADES DE CALOR REDUCIDO EN PROCESOS CICLICOS CUASIESTATICOS REVERSIBLES CUALESQUIERA.

Utilizemos el siguiente esquema técnico general, de los ciclos que se realizan entre dos recipientes de energía:

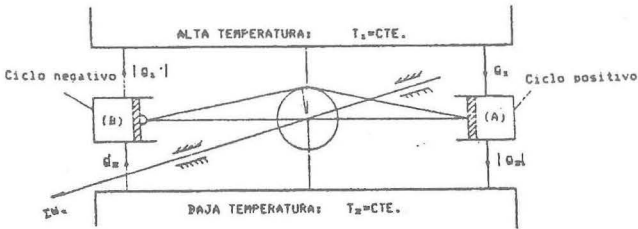


FIG. 5.2

- (A) Máquina que realiza un ciclo reversible cualquiera con un portador de energía cualquiera.
- (B) Máquina que realiza un ciclo reversible de CARNOT, con un portador de energía gas ideal.

La instalación trabaja estacionariamente y de modo que: $Q'_2 = |Q_2|$
Entonces las posibilidades para Q_1 y $|Q'_1|$ son:

- a) $Q_1 > |Q'_1|$
- b) $Q_1 < |Q'_1|$
- c) $Q_1 = |Q'_1|$

a) Si $Q_1 > |Q'_1|$, entonces:

$$\text{MAQUINA (A): } Q_1 = |Q_2| + W_{u,2} \rightarrow W_{u,2} = Q_1 - |Q_2|$$

$$\text{MAQUINA (B): } |Q'_1| = Q'_2 + |W_{u,2}| \rightarrow W_{u,2} = |Q'_1| - Q'_2$$

$\therefore |\Delta W_{tl}| = Q_1 - |Q'_1|$, significa que calor se transforma totalmente en trabajo.

Lo cual viola la 2ª ley (Primer enunciado), y por eso esta suposición no vale.

b) Si $Q_1 < |Q'_1|$, significa que como ambos ciclos son reversibles, entonces, pueden trabajar en direcciones opuestas volviendo al primer caso ya analizado.

c) Si $Q_1 = |Q'_1|$

Entonces tendríamos que como $Q'_2 = |Q_2|$, los trabajos de los ciclos son también iguales: $W_{u,2} = |W_{u,1,2}|$

Es decir: $Q_1 - |Q_2| = |Q'_1| - Q'_2$

$$\frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = \frac{|Q'_1| - |Q_2'|}{|Q'_1|}; \quad 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2'}{|Q'_1|}$$

$$\therefore \eta_{th(A)} = \eta_{th(B)}$$

Entonces:

$$1 - \frac{|Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}; \quad \frac{T_2}{T_1} + \frac{Q_2}{Q_1} = 0$$

$$\frac{T_2}{T_1} \cdot \left(\frac{Q_1}{T_2}\right) + \frac{Q_2}{Q_1} \left(\frac{Q_1}{T_2}\right) = 0$$

$$\therefore \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$$

Para generalizar el problema, vamos a considerar ahora que los recipientes de energía son de temperatura variable. Entonces el ciclo en el diagrama (P-V) sería:

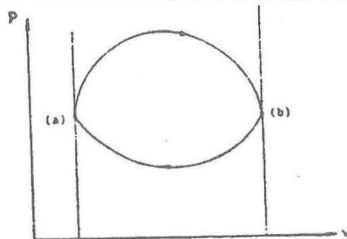


FIG. 5.3

Hagamos que esta ciclo esté formado por una gran cantidad de pequeños ciclos de Carnot:

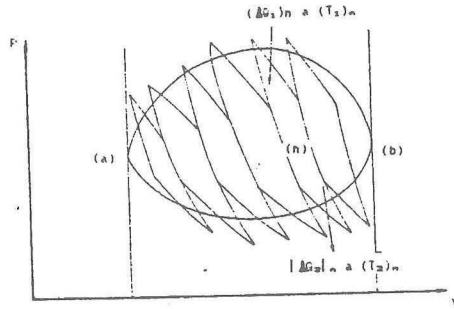


FIG. 5.4

Para el n -ésimo (n) ciclo de Carnot podemos escribir:

$$\left(\frac{\Delta Q_1}{T_1}\right)_n + \left(\frac{\Delta Q_2}{T_2}\right)_n = 0$$

En el límite:

$$d\left(\frac{Q_1}{T_1}\right)_n + d\left(\frac{Q_2}{T_2}\right)_n = 0$$

Donde Q_1 y Q_2 son función de la temperatura. Integrando para todo el ciclo:

$$\int_a^b \frac{dQ}{T} + \int_a^b \frac{dQ}{T} = 0$$

$$\therefore \oint \frac{dQ}{T} = 0,$$

que es la llamada IGUALDAD DE CLAUSIUS.

El término dQ/T , se llama cantidad de calor reducido y se comporta como el cambio de una magnitud de estado.

5.3 EL CAMBIO DE ENTROPIA PARA PROCESOS CUASISTATICOS REVERSIBLES CUALESQUIERA

Consideremos en el diagrama (P-V) un ciclo constituido por dos cambios de estado reversibles 1-2 y 2-1 cualesquiera:

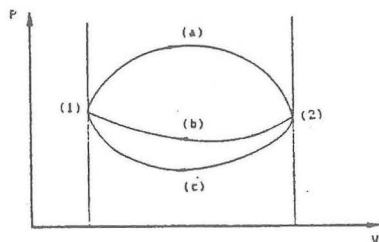


FIG. 5.5

$$De b \int \frac{dQ}{T} = 0; \int_{1(a)}^2 \frac{dQ}{T} + \int_{2(b)}^1 \frac{dQ}{T} = 0$$

$$\int_{1(a)}^2 \frac{dQ}{T} - \int_{1(b)}^2 \frac{dQ}{T} = 0$$

$$\int_{1(a)}^2 \frac{dQ}{T} = \int_{1(b)}^2 \frac{dQ}{T}$$

Si consideramos un tercer camino (c), tendríamos:

$$\int_{1(a)}^2 \frac{dQ}{T} + \int_{2(c)}^1 \frac{dQ}{T} = 0$$

$$\int_{1(a)}^2 \frac{dQ}{T} - \int_{1(c)}^2 \frac{dQ}{T} = 0$$

$$\int_{1(a)}^2 \frac{dQ}{T} = \int_{1(c)}^2 \frac{dQ}{T}$$

A esto se llama el cambio de una nueva magnitud de estado que no depende de la trayectoria seguida, sino del estado inicial y final, o sea el cambio de la entropía:

$$ds = \frac{\delta Q}{T}$$

T, es la temperatura a la cual se añade o evacua el calor:

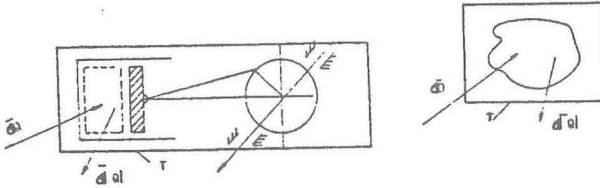


FIG. 5.6

Finalmente, para el ciclo podemos también establecer:

$$\oint ds = \oint \frac{\delta Q}{T} = 0$$

5.4 EL CAMBIO DE ENTROPIA PARA UN VOLUMEN DE CONTROL CON VARIACION DE MASA

Considerando, el mismo volumen de control que para la parte 4.6, tendremos:

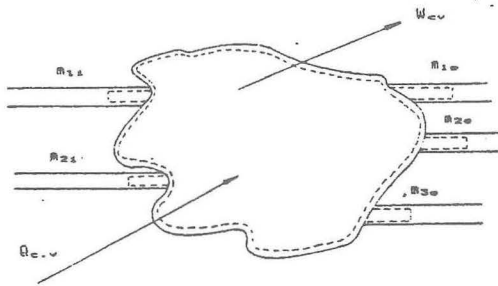


FIG. 5.7

Generalizando la aplicación de la segunda ley:

$$(S_2 - S_1) = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$$

Tendremos para este caso:

$$\sum m_e \cdot s_e - \sum m_i \cdot s_i + (m_2 \cdot s_2 - m_1 \cdot s_1)_{c.v} = \int_0^{\cdot} \frac{(\dot{Q}_{c.v})}{T} dt$$

El balance de masas es el mismo que para 4.6.

PROBLEMAS DE APLICACION

PROBLEMA (4-5).1

Butano gaseoso (C_4H_{10}); cuyo comportamiento es aproximadamente ideal, se expande politrópicamente desde 190 bares y 1275.6 K hasta 19 bares y 850.4 K. Se pide:

- Evaluar el trabajo técnico específico cuando la expansión tiene lugar en un cilindro-pistón, como sistema cerrado. Además verifique la reversibilidad.
- Evaluar, el trabajo técnico específico cuando la expansión tiene lugar en un sistema abierto tipo turbina. Además, verifique la reversibilidad. Puede considerar la presión atmosférica equivalente a 1 bar.

Solución:

a) De ecuación del Portador de Energía:

$$q_{1,2} = (u_2 - u_1) + \int_1^2 p dv = c (T_2 - T_1)$$

$$\text{y como: } \frac{850.4}{1275} = \left(\frac{19}{190} \right)^{\frac{n-1}{n}} \therefore n = 1.2137 \text{ y}$$

$$c = \frac{1.2137 * 1.5734 - 1.7164}{0.137} = 0.9042 \text{ KJ/Kg} \cdot \text{K}$$

Luego;

$$q_{1,2} = 0.9042 (850.4 - 1275.6) = -384.47 \text{ KJ/Kg}$$

$$\text{También: } v_1 = \frac{143.04 * 1275.6}{190 * 10^5} = 0.00960 \text{ m}^3 / \text{Kg}$$

$$v_2 = \frac{143.04 * 850.4}{19 * 10^5} = 0.06402 \text{ m}^3 / \text{Kg}$$

De ecuación para el sistema entero:

$$q_{1,2} = (u_2 - u_1) + \int_1^2 P_o dv + w_{1,2}$$

$$\therefore W_{T1,2} = -384.47 - 5.442 + 669.01 = 279.10 \text{ KJ/K}$$

y de ecuación para la transferencia de energía:

$$\int_1^2 P dv = W_{1,2} + \int_1^2 P_o dv$$

$$\frac{0.14304 (850.4 - 1275.6)}{-0.2137} = 279.10 + 5.442$$

$$\therefore 284.61 = 284.54;$$

El ligero error es debido a los redondeos.

EL PROCESO ES REVERSIBLE!

b) De la ecuación de energía para el sistema entero:

$$q_{1,2} = (h_2 - h_1) + w_{1,2} - 384.47 = 1.7164 (850.4 - 1275.6) + w_{1,2}$$

$$\therefore w_{1,2} = 345.34 \text{ KJ/Kg.}$$

De la ecuación para la transferencia de energía:

$$-\int_1^2 v dp = w_{1,2}$$

$$\therefore n \int_1^2 P dv = w_{1,2}$$

$$1.2137(284.61) = 345.34$$

$$\therefore 345.43 = 345.34 \text{ Ligero error debido a los redondeos.}$$

EL PROCESO ES REVERSIBLE!

PROBLEMA (4-5).2

Un gas natural cuya composición en términos de porcentaje de volumen es: CH_4 , 68.4; C_2H_6 , 30.4; CO_2 , 0.1; N_2 , 1.1, se comprime politrópicamente desde 1 bar y 20 °C hasta 8 bares y 400 K en un compresor que trabaja como sistema abierto. Se pide:

- Evaluar el trabajo técnico específico y verificar la reversibilidad.
- Representar en el diagrama (T-s) de gas ideal, todos los términos de energía.

Solución:

a) Para la mezcla se ha evaluado:

$$C_{pm} = 2.0147 \text{ KJ/Kg-K}; C_{vm} = 1.6084 \text{ KJ/Kg-K}$$

$$R_m = 0.4063 \text{ KJ/Kg-K}; K_m = 1.2526$$

$$De; \frac{400}{293} = (8)^{\frac{n-1}{n}} \therefore n = 1.1761$$

$$y c = \frac{1.1761 * 1.6084 - 2.0147}{0.1761} = - 0.6988 \text{ KJ / Kg - K}$$

Con ecuación de energía Portador de energía:

$$q_{1.2} = (h_2 - h_1) - \int_1^2 v dp = c (T_2 - T_1)$$

$$q_{1.2} = - 0.6988 (400-293) = - 74.77 \text{ KJ/Kg}$$

De ecuación de energía sistema entero:

$$q_{1.2} = (h_2 - h_1) + w_{11.2}$$

$$-74.77 = 2.0147(400-293) + w_{11.2}$$

$$\therefore w_{11.2} = -290.34 \text{ KJ/Kg.}$$

y de ecuación de la transferencia de energía:

$$- \int v dp = w_{11.2}$$

$$n \int p dv = w_{11.2}$$

$$11761 \left[\frac{0.4063 (400-293)}{-0.1761} \right] = - 290.34$$

$$\therefore -290.34 = -290.34$$

EL PROCESO ES REVERSIBLE.

$$b) De q_{1.2} = (h_2 - h_1) - \int_1^2 v dp = (u_2 - u_1) + \int_1^2 p dv$$

De los cálculos se puede ver que $n < K$.

Luego en el diagrama (T-s) tendremos:

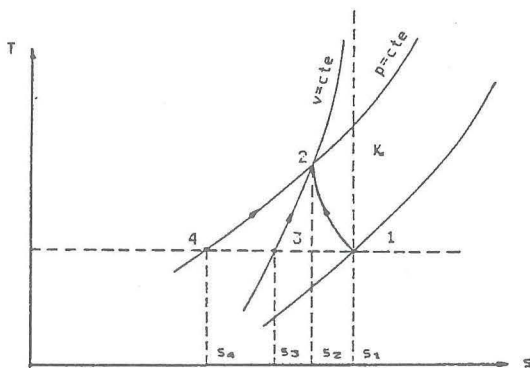


FIG. (4-5).1

$$q_{1,2} = \int_1^2 T ds = \text{Area} (s_1 - 1 - 2 - s_2)$$

$$(u_2 - u_1) = \int_1^2 cvdT = \int_3^2 T ds = \text{Area} (s_2 - 2 - 3 - s_3)$$

$$(h_2 - h_1) = \int_1^2 c_p dT = \int_4^2 T ds = \text{Area} (s_2 - 2 - 4 - s_4)$$

$$\int_1^2 P dv = q_{1,2} - (u_2 - u_1) = \text{Area} (s_1 - 1 - 2 - 3 - s_3)$$

$$-\int_1^2 v dp = q_{1,2} - (h_2 - h_1) = \text{Area} (s_1 - 1 - 2 - 4 - s_4)$$

PROBLEMA (4-5).3

Una bomba de agua que trabaja como sistema abierto bombea el agua adiabática y reversiblemente desde 1 bar y 20 °C hasta 8 bares de presión, evaluar los calores específicos a presión constante y a volumen constante del agua.

NOTA.- Cuando el líquido es comprimido, se puede asumir como líquido saturado a la temperatura del líquido comprimido.

Solución:

El esquema técnico es:

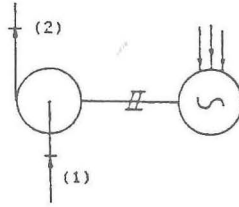


FIG. (4-5).2

De ecuación de energía para el portador de energía:

$$q_{1,2} = 0 = (h_2 - h_1) - \int_1^2 v dp$$

$$h_2 = 83.96 + 0.001 (8 - 1) * 10^2$$

$$h_2 = 84.66 \text{ KJ/Kg, y de tablas: } t_2 = 20.17 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{y de Poisson: } \frac{293.17}{293} = (8)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$\text{se obtiene: } K = 1.0003 = \frac{C_p}{C_v}$$

$$\text{y } C_p = \frac{h_2 - h_1}{t_2 - t_1} = \frac{84.66 - 83.96}{20.17 - 20}$$

$$\therefore \text{ Resolviendo: } C_p = 4.1176 \text{ KJ/Kg-K.}$$

$$C_v = 4.1164 \text{ KJ/Kg-K.}$$

PROBLEMA (4-5).4

Utilizando la información del problema (4-5).2; suponga que este gas se almacena a través de una válvula adiabática en un recipiente esférico de 1 metro de diámetro ($V=4.\pi.R^3/3$). Cuando la presión en el recipiente iguala a la presión de descarga del compresor, la válvula se cierra y el compresor se para.

Si el recipiente ha sido llenado en 5 minutos, evaluar el trabajo técnico total en KW necesario para el compresor.

Solución:

El esquema técnico correspondiente es:

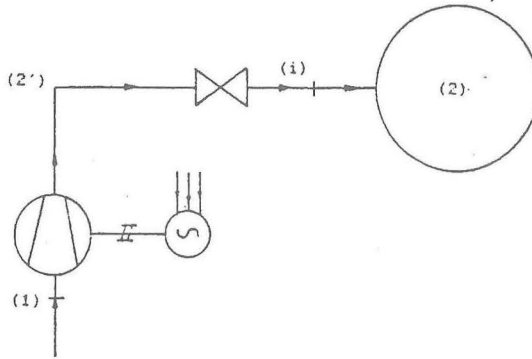


FIG. (4-5).3

De ecuación de energía para el sistema entero:

$$\dot{Q}_{1,2} = \dot{m} (h_2 - h_1) + \dot{W}_{11,2} \dots (\alpha)$$

y de ecuación de energía para el volumen de control con variación de masa:

$$h_1 = u_2; C_{pi} \cdot T_i = C_{v2} T_2; T_2 = km \cdot T_i$$

y como $T_2 = T_i$; $T_2 = 1.2526(400) = 501.04 \text{ K}$

$$V_2 = \frac{4}{3} * 3.1416 * (0.5)^3 = 0.5236 \text{ m}^3$$

$$\text{con: } \dot{m}_2 = \dot{m} = \frac{P_2 \cdot V_2}{R_2 \cdot T_2}$$

$$= \frac{8 * 10^5 * 0.001745}{406.3 * 501.04} = 6.8575 * 10^{-3} \text{ kg /s}$$

$$\text{Reemp. en } (\alpha): \dot{W}_{11,2} = - 0.0068575 (290.34) =$$

$$= - 1.99 \text{ KW.}$$

PROBLEMA (4-5).5

Para los intercambiadores de calor ideales que se muestran en los esquemas técnicos de las figuras siguientes, evaluar el valor de la temperatura t_2 , para cada portador de energía indicado:

a)

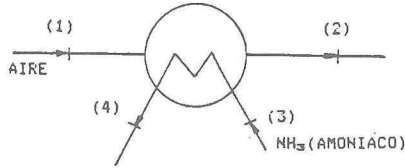


FIG. (4-5).4

$$t_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C}, \dot{m}_{NH_3} = 0.0221 \text{ kg/s}, \dot{m}_{aire} = 0.6324 \text{ kg/s}.$$

(3), líquido saturado; (4), vapor saturado; $p_1=p_2$; $p_3=p_4$; intercambiador de calor adiabático.

b)

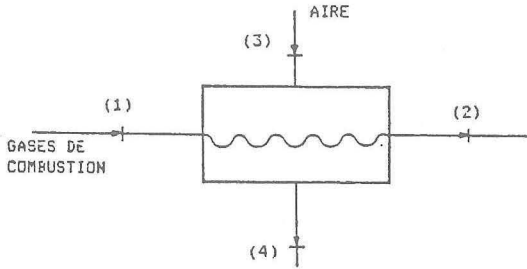


FIG. (4-5).5

$t_1 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$; $\dot{m}_{gc} = 1.0050 \text{ Kg/s}$; $\dot{m}_{aire} = 0.6324 \text{ Kg/s}$
 $t_3 = -9.87 \text{ }^\circ\text{C}$; $C_{pgc} = 1.0410 \text{ KJ/Kg}\cdot\text{K}$; $p_1=p_2$; $p_3=p_4$; intercambiador de calor adiabático.

Solución:

$$\begin{aligned} a) t_2 &= t_1 - \frac{\dot{m}_v (h_4 - h_3)}{\dot{m}_a \cdot C_{pa}} = \\ &= 30 - \frac{0.0221}{0.6324} \cdot \frac{1}{1.0035} (1467.9 - 322.9) = \end{aligned}$$

$$= -9.87 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$b) t_2 = t_1 - \frac{\dot{m}_a \cdot C_{pa}}{\dot{m}_{gc} \cdot C_{pgc}} (t_4 - t_3)$$

$$= 200 - \frac{0.6324 \cdot 1.0035}{1.0050 \cdot 1.0410} (200 + 9.87) = 72.69 \text{ }^\circ\text{C}.$$

PROBLEMA (4-5).6

Se propone un ciclo positivo-reversible de generación de potencia, utilizando como portador de energía al Helio tal como se indica en el esquema técnico de la figura siguiente:

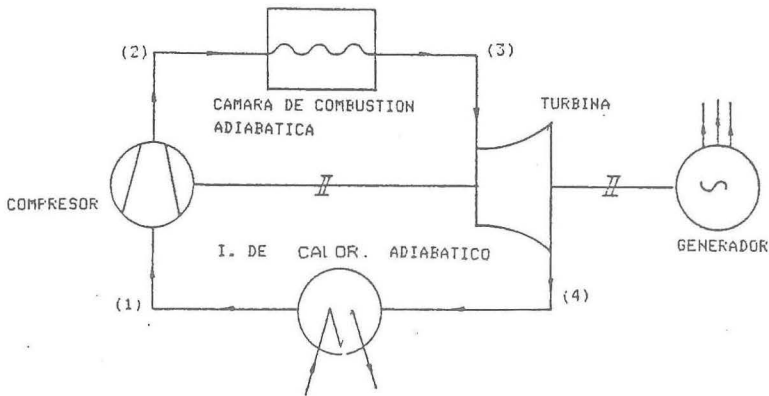


FIG. (4-5).6

La información técnica adicional es la siguiente:

$$p_1 = 1 \text{ bar}, t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}; p_2 = 10 \text{ bar},$$

$$T_2 = 800 \text{ K}; p_3 = 10 \text{ bar}, T_3 = 1300 \text{ K};$$

$$p_4 = 1 \text{ bar}, T_4 = 476.12 \text{ K}; Q_{2,3} = 200 \text{ KW}.$$

Se pide:

- Dibujar el diagrama (T-s) de gas ideal y evaluar flujo de masa de helio en Kg/s, necesario para el ciclo.
- Evaluar el rendimiento térmico; y aplicar y calcular la igualdad de CLAUSIUS.

Solución:

a) El diagrama (T-s) de gas ideal será:

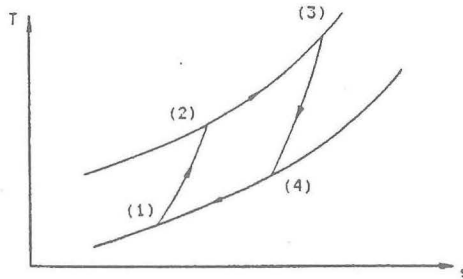


FIG. (4-5).7

Para la cámara de combustión:

$$\dot{Q}_{2,3} = 200 = \dot{m}_{He} \cdot C_{pHe} (T_3 - T_2)$$

$$\dot{m}_{He} = \frac{200}{5.1926 (1300 - 800)} = 0.0770327 \text{ Kg/s.}$$

b)

$$De; \frac{800}{293} = (10)^{\frac{n_{1,2}-1}{n_{1,2}}} \therefore n_{1,2} = 1.7737;$$

$$c = \frac{1.7737 * 3.1156 - 5.1926}{0.7737} = 0.4311$$

Luego:

$$q_{1,2} = 0.4311(800-293) = 218.57 \text{ KJ/Kg.}$$

$$y w_{1,2} = 218.57-2632.65 = -2414.08 \text{ KJ/Kg.}$$

$$De; \frac{1300}{476.12} = (10)^{\frac{n_{3,4}-1}{n_{3,4}}} \therefore n_{3,4} = 1.7737;$$

$$c = \frac{1.7737 * 3.1156 - 5.1926}{0.7737} = 0.4311$$

$$\text{Luego: } q_{3,4} = 0.4311(476.12-1300) = -355.17 \text{ KJ/Kg.}$$

$$y w_{3,4} = -355.17+4278.08 = 3922.91 \text{ KJ/Kg.}$$

Entonces $\eta_{th} = 116.23/200 = 0.5811$

$$De; \oint \frac{\dot{d}Q}{T} = 0; \int_2^3 \frac{\dot{d}Q}{T} + \int_4^1 \frac{\dot{d}Q}{T} = 0;$$

$$\dot{m}_{He} \cdot C_{pHe} \ln \frac{T_3}{T_2} + \dot{m}_{He} * C_{pHe} * \ln \frac{T_1}{T_4} = 0$$

$$\ln \frac{1300}{800} + \ln \frac{293}{476.12} = 0 ; 0.4855 - 0.4855 = 0$$

$$\therefore 0 \equiv 0$$

EL CICLO ES REVERSIBLE:

PROBLEMA (4-5).7

Considere el esquema técnico que se indica en la figura siguiente y que corresponde a un ciclo positivo-reversible generador de potencia y que utiliza como portador de energía al agua:

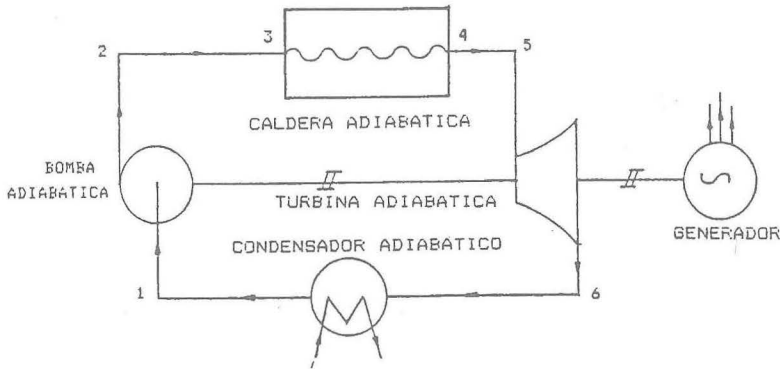


FIG. (4-5).8

La información técnica adicional es la siguiente:

$$p_1 = p_6 = 0.5 \text{ bar}; p_2 = p_3 = p_4 = p_5 = 50 \text{ bar}; x_6 = 0.90; v_1 = v_2 \text{ m}^3/\text{Kg}.$$

Considere: (2-3), líquido ideal; (4-5), gas ideal; (1), líquido saturado; (2), líquido comprimido; (3), líquido saturado; (4), vapor saturado; (5), vapor rec.; (6), vapor húmedo.

Se pide:

- a) Dibujar los diagramas de estado de sustancia pura: (p-v), (T-s), (h-s), y (p-h).
- b) Evaluar el rendimiento térmico, y aplicar y calcular la igualdad de CLAUSIUS.

Solución:

- a) Los diagramas de estado para la sustancia pura (p-v), (T-s), (h-s), y (p-h) son:

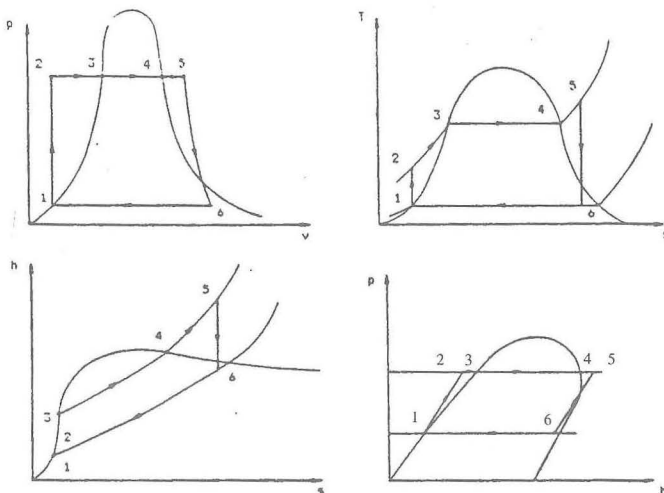


FIG. (4-5).9

$$\begin{aligned} \text{Con: } h_2 &= h_1 + v(P_2 - P_1) \\ &= 340.49 + 0.001030(50 - 0.5) \cdot 10^2 \\ &= 345.5885 \text{ KJ/Kg.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_6 &= h' + x_6(h'' - h') \\ &= 340.49 + 0.9(2645.9 - 340.49) \\ &= 2415.359 \text{ KJ/Kg-K} \end{aligned}$$

$$\therefore t_5 = 489.48 \text{ }^\circ\text{C}; h_5 = 3409.05 \text{ KJ/Kg};$$

$$t_6 = t_1 = 81.33 \text{ }^\circ\text{C}; t_3 = 263.99 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$C_{p4,5} = 2.7263 \text{ KJ/Kg-K};$$

$$C_{p2,3} = 4.4338 \text{ KJ/Kg-K.}$$

$$\begin{aligned} \text{Entonces: } q_{2,5} &= 3409.05 - 345.5885 \\ &= 3063.46 \text{ KJ/Kg.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |q_{6,1}| &= 2415.359 - 340.49 \\ &= 2074.87 \text{ KJ/Kg.} \end{aligned}$$

$$\therefore \eta_{th} = 988.59/3063.46 = 0.3227$$

$$De; \oint \frac{\dot{d}q}{T} = 0;$$

$$4.4338 \text{ Ln} \frac{263.99 + 273}{81.91 + 273} + \frac{2794.3 - 1154.23}{263.99 + 273}$$

$$+ 2.7263 \text{ Ln} \frac{489.48 + 273}{263.99 + 273} - \frac{2415.359 - 340.49}{81.33 + 273}$$

$$5.8499 - 5.8558 = 0$$

- 0.0059 \neq 0, el error es muy pequeño, debido a los redondeos o aproximaciones.
Se puede decir que el ciclo es REVERSIBLE!

PROBLEMA (4-5).8

Se quiere fabricar 20Kg.m. de hielo a -10 °C y a presión atmosférica de 1 bar, de agua a 20 °C.

Utilizar: $C_{p(\text{agua})} = 4.186 \text{ KJ/Kg-K.}$

$C_{p(\text{hielo})} = 2.05 \text{ KJ/Kg-K.}$

$C_{\text{fusión hielo}} = 333 \text{ KJ/Kg.}$

$t_{\text{ambiente}} = 25 \text{ °C.}$

Evaluar el trabajo máximo total a realizar en KJ.

Solución:

Se pueden realizar los siguientes ciclos entre los recipientes de energía:

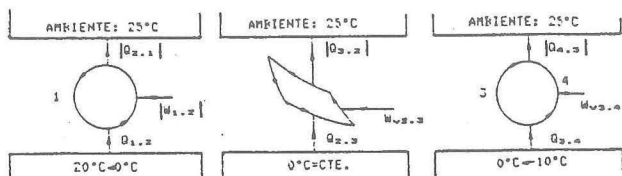


FIG. (4-5).10

Aplicando la igualdad de Clausius:

$$\oint \frac{\dot{d}Q}{T} = 0$$

$$m. C_p \cdot \text{Ln} \frac{T_1}{T_2} - \frac{|Q_{2,1}|}{T_2} = 0;$$

$$|Q_{2.1}| = 298 * 20 * 4.186 \ln \frac{293}{273} = 1763.88 \text{ KJ.}$$

$$Q_{1,2} = 20 * 4.186 (20 - 0) = 1674.4 \text{ KJ.}$$

$$\therefore |W_{v1,2}| = 1763.88 - 1674.4 = 89.48 \text{ KJ.}$$

$$\frac{Q_{2,3}}{T_3} - \frac{|Q_{3,2}|}{T_a} = 0; Q_{2,3} = 20 * 333 = 6660 \text{ KJ.}$$

$$|Q_{3,2}| = 298/273 * 6660 = 7269.89 \text{ KJ.}$$

$$\therefore |W_{v2,3}| = 7269.89 - 6660 = 609.89 \text{ KJ.}$$

$$m \cdot Ch \cdot \ln \frac{T_3}{T_4} - \frac{|Q_{4,3}|}{T_a} = 0$$

$$|Q_{4,3}| = 298 * 20 * 2.05 \ln \frac{273}{263} = 455.95 \text{ KJ.}$$

$$Q_{3,4} = 20 * 2.05 (0 + 10) = 410 \text{ KJ.}$$

$$\therefore |W_{v3,4}| = 455.95 - 410 = 45.95 \text{ KJ.}$$

LUEGO:

$$|W_{v\text{MAX.TOTAL}}| = 89.48 + 609.89 + 45.95 = 745.32 \text{ KJ}$$

PROBLEMA (4-5).9

Considere el esquema técnico de la instalación que se muestra en la figura siguiente:

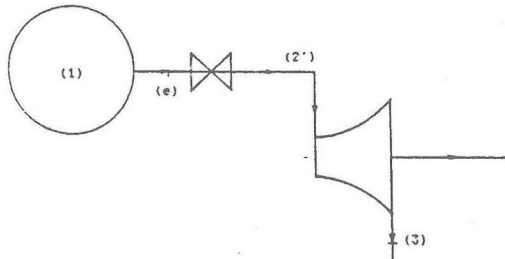


FIG. (4-5).11

La información técnica complementaria es la siguiente:

$$V_{\text{tanque}} = (4/3) \pi R^3, \text{ con vapor recalentado, } R = 0.50 \text{ m., } p_2 = p_1 = 10 \text{ bar.,}$$

$$W_{12,3} = 10 \text{ KW., } x_3 = 0.90, p_3 = 0.5 \text{ bar.}$$

En todo momento se mantienen constantes:

$p_1 = p_2$; t_2 ; t_1 ; a causa de un suministro constante de calor al tanque; y a la válvula adiabática reguladora de presión. Se pide:

- t_2 , t_1 , masa de vapor en el tanque cuando está lleno.
- El flujo de masa de vapor, el tiempo que permanecerá funcionando la turbina entregando los 10 KW; y la cantidad de calor suministrado al tanque adiabático.

Solución:

$$\begin{aligned} \text{a) } h_3 &= h' + x_3(h'' - h') \\ &= 340.49 + 0.9(2305.4) = 2415.35 \text{ KJ/Kg.} \\ s_3 &= s_2 = s' + x_3(s'' - s') \\ &= 1.0910 + 0.9(6.5029) = 6.94361 \text{ KJ/Kg-K.} \end{aligned}$$

De tablas, interpolando:

$$\begin{aligned} h_2 &= 2952.96 \text{ KJ/Kg;} \\ t_2 &= 254.77 \text{ }^\circ\text{C.} \end{aligned}$$

De ecuación USUF:

$$\begin{aligned} h_e &= u_1; \text{ y como } h_e = h_2, \\ \therefore 2952.96 &= u_1 \end{aligned}$$

De tablas, interpolando: $t_1 = 397.36 \text{ }^\circ\text{C}$;

$$\begin{aligned} v_1 &= 0.3053 \text{ m}^3/\text{Kg.}; \\ V_1 &= (4/3) * 3.1416 * (0.5)^3 = 0.5236 \text{ m}^3. \\ \text{y } m_1 &= V_1/v_1 = 0.5236/0.3053 = 1.715 \text{ Kgm.} \end{aligned}$$

b) De;

$$W_{12,3} = \dot{m}_v (h_2 - h_3); \dot{m}_v = \frac{10}{537.61} = 0.0186 \text{ Kg/s.}$$

$$t = 1.715 * 1/0.0186 = 92.20 \text{ s; } 1.54 \text{ Horas.}$$

$$\dot{Q}_I = \dot{m}_v \cdot h_I = 0.0186 * 3258.29 = 60.60 \text{ KJ/s.}$$

$$\dot{Q}_I = 60.60 \text{ KW.}$$

PROBLEMA (4-5).10

De 100 Kg. de vapor de agua recalentado a 200 °C y 1 bar que se enfría isobáricamente hasta -10 °C, evaluar el trabajo máximo total a obtenerse en KJ.

UTILIZAR:

- $C_{p(\text{vapor})} = 1.86 \text{ KJ/Kg-K.}$
- $C_{p(\text{agua})} = 4.186 \text{ KJ/Kg-K.}$
- $C_{p(\text{hielo})} = 2.05 \text{ KJ/Kg-K.}$
- $C_{\text{fusión hielo}} = 333 \text{ KJ/Kg.}$
- $t_{\text{ambiente}} = -10 \text{ °C.}$
- $P_{(\text{ambiente})} = 1 \text{ bar.}$

Solución:

Se pueden realizar los siguientes ciclos entre los recipientes de energía:

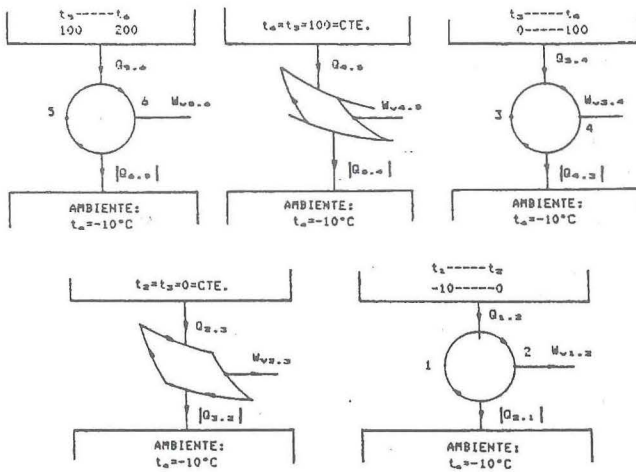


FIG. (4-5).12

$$Q_{5,6} = 100 \cdot 1.86 (473 - 373) = 18600;$$

$$Q_{6,5} = -263 \cdot 100 \cdot 1.86 \ln 473/373$$

$$Q_{6,5} = -11618.86$$

$$\therefore W_{5,6} = 18600 - 11618.86 = 6981.14 \text{ KJ.}$$

$$Q_{4,5} = 100 \cdot 2257 = 225700;$$

$$Q_{5,4} = -263/373 \cdot 225700 = -159139.68$$

$$\therefore W_{4,5} = 225700 - 159139.68 = 66560.32 \text{ KJ.}$$

$$Q_{3,4} = 100 \cdot 4.186 (373 - 273) = 41860;$$

$$Q_{4,3} = -263 \cdot 100 \cdot 4.186 \ln 373/273$$

$$Q_{4,3} = -34360.38$$

$$\therefore W_{v,3,4} = 41860 - 34360.38 = 7499.62 \text{ KJ.}$$

$$Q_{2,3} = 100 \cdot 333 = 33300;$$

$$Q_{3,2} = -263/273 \cdot 33300 = -32080.22$$

$$\therefore W_{v,2,3} = 33300 - 32080.22 = 1219.78 \text{ KJ.}$$

$$Q_{1,2} = 100 \cdot 2.05(0+10) = 2050 \text{ KJ};$$

$$Q_{2,1} = -263 \cdot 100 \cdot 2.05 \ln 273/263$$

$$Q_{2,1} = -2011.99$$

$$\therefore W_{v,1,2} = 2050 - 2011.99 = 38.01 \text{ KJ.}$$

Luego:

$$W_{v\text{MAX.TOTAL}} = 6981.14 + 66560.32 + 7499.62 + 1219.78 + 38.01$$

$$\therefore W_{v\text{MAX.TOTAL}} = 82298.87 \text{ KJ.}$$

PROBLEMA (4-5).11

Dos compresores reversibles comprimen bioxido de carbono (CO_2) desde 1 bar y 15°C hasta 36.95 bar y 227°C y lo almacenan a través de una válvula adiabática en un tanque adiabático y esférico de 1 metro de radio [$V = (4/3) \cdot \pi \cdot R^3$]. La válvula se cierra cuando la presión en el tanque es igual a la de descarga del compresor.

Se pide evaluar la masa de CO_2 que ingresó en el tanque y el tiempo que demoró el compresor en llenarlo, si la potencia consumida fue de 5 KW.

Solución:

El esquema técnico será:

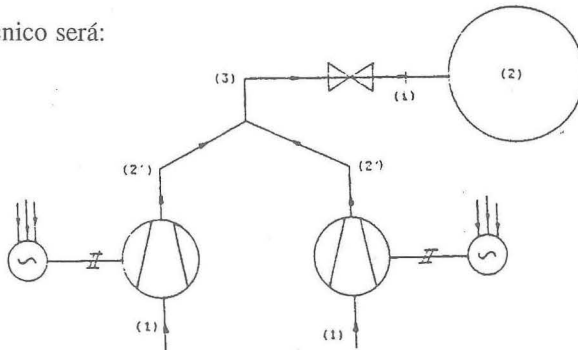


FIG. (4-5).13

De ecuación USUF: $h_1 = u_2$; $C_{pi} \cdot T_1 = C_{v2} \cdot T_2$

$$\therefore T_2 = K \cdot T_1; \text{ pero: } T_1 = T_3$$

$$T_2 = T_3 = 500\text{K.}$$

Luego: $T_2 = 1.289 \cdot 500 = 644.5 \text{ K.}$

Entonces: $m_2 = P_2 \cdot V_2 / R_2 \cdot T_2$;

$$V_2 = 4/3 \cdot 3.1416(1)^3 = 4.1888 \text{ m}^3.$$

$$\therefore m_2 = (36.95 \cdot 10^5 \cdot 4.1888) / (188.92 \cdot 644.5) \\ = 127.12 \text{ Kgm.}$$

Por otra parte para un compresor:

$$q_{1,2} = C_p(T_2 - T_1) + w_{1,2}$$

$$\text{De; } 500/288 = (36.95 / 1)^{(n-1/n)}$$

$$\therefore n = 1.1804$$

Como del cálculo: $c = -0.3942 \text{ KJ/Kg-K.}$

$$-0.3942(500-288) = 0.8418(500-288) + w_{1,2}$$

$$\therefore w_{1,2} = -262.03 \text{ KJ/Kg.}$$

Es decir:

$$-2.5 \text{ KW} = \dot{m} (262.03)$$

$$\therefore \dot{m} = 0.009541 \text{ Kg/s.}$$

$$y; t = 127.12 \cdot 1 / 0.009541$$

$$= 13323.55 \text{ s; } 3.7 \text{ Horas.}$$

Pero como son dos compresoras, el tiempo se reduce a la mitad, es decir:

$$t = 6662.47 \text{ s; } 1.85 \text{ Horas.}$$

PROBLEMAS (4-5).12

Una bomba de agua, adiabática, bombea agua a una caldera desde 0.5 bar (líquido saturado) hasta 20 bar (líquido comprimido). En la caldera adiabática se evapora el agua hasta vapor recalentado, por medio de un serpentín a través del cual circulan gases de combustión con una temperatura de entrada de 600 °C y con la siguiente composición:

0.20 H₂O + 0.345 CO₂ + 1.482 N₂, cada uno de los cuales fluye en términos de KMOL/min. El intercambio de calor en la caldera se realiza isobárica e idealmente.

Finalmente el vapor recalentado que sale de la caldera se expande en una turbina adiabática, isentrópicamente hasta la presión de 0.5 bares (vapor recalentado). Si la turbina genera 20 KW, cuál será el flujo de masa de vapor consumido

por la turbina y cuál el valor de la temperatura de los gases de combustión a la salida del serpentín en °C.

Solución:

El esquema técnico, sería:

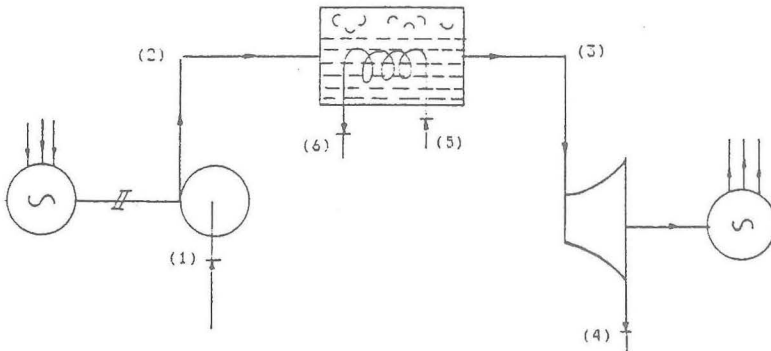


FIG. (4-5).14

De;

$$\dot{W}_{t3,4} = \dot{m}_v (h_3 - h_4) = 20 \text{ KJ/s.}$$

$$\text{Pero: } \eta_{i.c} = 1 = \frac{\dot{Q}_{2,3}}{\dot{Q}_{2,5}} = \frac{h_3 - h_2}{h_5 - h_2}$$

$$h_3 = h_5; t_3 = t_5 = 600 \text{ °C}$$

$$\text{y con 20 bar: } h_3 = 3690.1 \text{ KJ/Kg;}$$

$$s_3 = s_4 = 7.7024 \text{ KJ/Kg-K}$$

$$\text{Con } s_4 = 7.7024 \text{ y 0.5 bar:}$$

$$h_4 = 2685.56 \text{ KJ/Kg.}$$

Luego:

$$\dot{m}_v = \frac{20}{(3690.1 - 2685.56)} = 0.0199 \text{ Kg/s}$$

Del intercambio de calor:

$$+ \dot{Q}_{2,3} = - \dot{Q}_{5,6}$$

$$\dot{m}_v (h_3 - h_2) = - \dot{m}_{gc} \cdot C_{pgc} \cdot (t_6 - t_5);$$

De la mezcla de gases se evalúa:

$$\dot{m}_{gc} = 1.0050 \text{ Kg/s}; C_{pgc} = 1.0410 \text{ KJ/Kg} \cdot \text{K}$$

y de; $h_2 = h_1 + v(P_2 - P_1)$

$$\therefore h_2 = 340.49 + 0.001030(20 - 0.5) \cdot 10^2$$

$$h_2 = 342.50 \text{ KJ/Kg.}$$

Reemplazando:

$$0.0199 \cdot (3690.1 - 342.50) = -1.0050 \cdot 1.0410 \cdot (t_6 - 600)$$

$$\therefore t_6 = 536.3 \text{ }^\circ\text{C.}$$

PROBLEMA (4-5).13

Considerando un ciclo de Carnot positivo-reversible, cuyo portador de energía es el Helio y el cual se comporta como gas ideal.

Primero se comprime isotérmicamente desde 1 bar y 293 K hasta 4 bar; y luego se comprime adiabáticamente hasta 6 bar. Se pide, analizar el ciclo completamente:

Solución:

El ciclo de Carnot en los diagramas (p-v) y (T-s) sería:

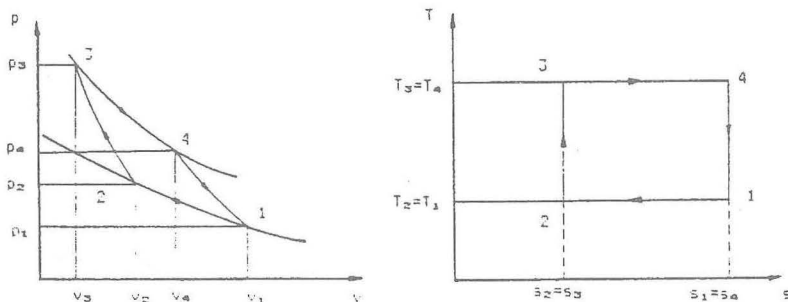


FIG. (4-5).15

$$1.- v_1 = 2077.03 \cdot 293 / (1 \cdot 10^5)$$

$$= 6.08569 \text{ m}^3/\text{Kg.}$$

$$v_2 = 2077.03 \cdot 293 / (4 \cdot 10^5)$$

$$= 1.52142 \text{ m}^3/\text{Kg.}$$

$$T_3 = 293(6/4)^{0.4001} = 344.61 \text{ K.}$$

$$v_3 = 2077.03 * 344.61 / (6 * 10^5) \\ = 1.19294 \text{ m}^3/\text{Kg.}$$

$$p_4 = 1(344.61/293)^{2.4993} = 1.5 \text{ bar.}$$

$$v_4 = 2077.03 * 344.61 / (1.5 * 10^5) \\ = 4.77177 \text{ m}^3/\text{Kg.}$$

$$2.- q_{3,4} = 2.07703 * 344.61 \\ * \text{Ln}(4.77177/1.19294) \\ = 992.26 \text{ KJ/Kg.}$$

$$3.- |q_{1,2}| = 2.07703 * 293 \text{Ln}(6.08569/1.52142) \\ = 843.66 \text{ KJ/Kg.}$$

$$4.- \sum w_t = W_N = \sum q. = 992.26 - 843.66 \\ = 148.6 \text{ KJ/Kg.}$$

$$5.- \eta_{th} = 148.6/992.26 = 0.1498 \rightarrow 14.98\%$$

$$6. - P_{me} = \frac{148.6 * 1000}{(6.08569 - 1.19294)} =$$

$$= 30371.467 \text{ N/m}^2 \rightarrow 0.30371 \text{ bar.}$$

$$7.- 992.26/344.61 - 843.66/293 = 0;$$

$$2.8794 - 2.8794 = 0$$

$$0 \equiv 0$$

el ciclo es reversible.

PROBLEMA (4-5).14

Considere un ciclo de Carnot positivo-reversible cuyo portador de energía es el mercurio (Hg), el cual se comporta como sustancia pura.

El ciclo se desarrolla entre las isóbaras de 14 bar y 1 bar. Considerando como base del ciclo, la intersección de la isóbara de 14 bares con la línea de líquido saturado y la línea de vapor saturado. Se pide, evaluar el rendimiento térmico y la igualdad de Clausius.

Solución

El ciclo de Carnot en el diagrama (T-s) sería:

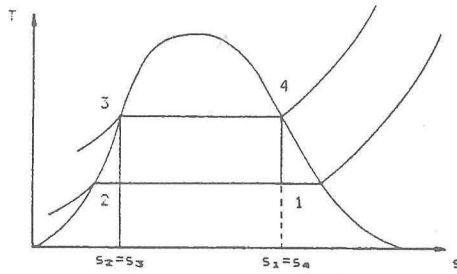


FIG. (4-5).16

$$x_2 = (0.1478 - 0.1136) / (0.5785 - 0.1136) \\ = 0.0736$$

$$h_2 = 48.45 + 0.0736(341 - 48.45) \\ = 69.98 \text{ KJ/Kg.}$$

$$x_1 = \frac{0.4992 - 0.1136}{0.5785 - 0.1136} = 0.8294$$

$$h_1 = 48.45 + 0.8294(341 - 48.45) = 291.09 \text{ KJ/Kg.}$$

Reemplazando en:

$$\eta_{th} = \frac{(h_4 - h_3) - (h_1 - h_2)}{(h_4 - h_3)} \\ = \frac{(362.55 - 73.63) + (291.09 - 69.98)}{(362.55 - 73.63)}$$

$$= 0.2347 \text{ KJ/KG. } \therefore \eta_{th} = 0.2347 \rightarrow 23.47 \%$$

$$de; \oint \frac{\delta \dot{q}}{T} = 0 : \frac{q_{3,4}}{T_{3,4}} - \frac{|q_{1,2}|}{T_{1,2}} = 0$$

$$\frac{288.92}{549 + 273} - \frac{221.11}{356.1 + 273} = 0$$

$$\therefore 0.3515 - 0.3515 = 0$$

el ciclo es reversible.

PROBLEMA (4-5).15

Se tiene un depósito de 1 metro cúbico de capacidad con Freón-12 a la temperatura de 20 °C y 0.7 de calidad. A través de una válvula se saca solamente vapor saturado hasta que la temperatura del freón-12 que queda sea de 0 °C.

Como la entalpía del vapor saturado varía con la temperatura, considere al valor de ésta a la salida del depósito como un valor promedio.

Asumiendo que el depósito es adiabático, que no hay trabajo, que se desprecian las energías cinéticas y potenciales, se pide calcular la masa de Freón-12 que se sacó del depósito (vapor saturado seco) en Kg.

Solución

El esquema técnico correspondiente sería:

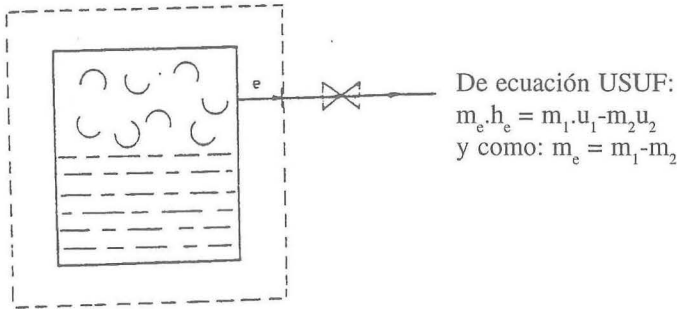


FIG. (4-5).17

$$\therefore m_2(h_e - u_2) = m_1 \cdot h_e - m_1 \cdot u_1 \dots (\alpha)$$

De tablas:

$$h_e = (195.641 + 187.397)/2 = 191.519 \text{ KJ/Kg.}$$

$$u_2 = 35.801 + 134.503 x_2;$$

$$v_2 = 0.000716 + 0.054673 x_2$$

$$v_1 = 0.0217716 \text{ m}^3/\text{Kg}; u_1 = 141.05 \text{ KJ/Kg}; m_1 = 1/0.0217716 = 45.93 \text{ Kg.}$$

Reemplazando en α :

$$\frac{1}{0.000716 + 0.054673 X_2} (191.519 - 35.801 -$$

$$134.503 X_2) = 45.93 * 191.519 - 6478.3$$

$$\therefore x_2 = 0.5897; v_2 = 0.032956 \text{ m}^3/\text{Kg}.$$

$$m_2 = 1/0.032956 = 30.34 \text{ Kgm}.$$

$$\text{La masa que salió: } m_e = m_1 - m_2 =$$

$$45.93 - 30.34 = 15.59 \text{ Kgm}.$$

$$m_e = 15.59 \text{ Kgm}.$$

PROBLEMA (4-5).16

En una turbina de vapor se expande vapor de agua recalentado en forma adiabática y reversiblemente desde 200 °C de temperatura hasta 1 bar de presión y 0.88 de calidad. El trabajo técnico de la turbina se utiliza totalmente para un compresor que comprime adiabática y reversiblemente etileno (C_2H_4), desde 2.56 bares y 291.8 °C. Los flujos de masa de vapor; y etileno, son de 1 Kg/s respectivamente.

Se pide:

- La presión del vapor de agua recalentado a la entrada de la turbina.
- La presión y temperatura del etileno a la descarga del compresor.

Solución:

- El esquema técnico correspondiente sería:

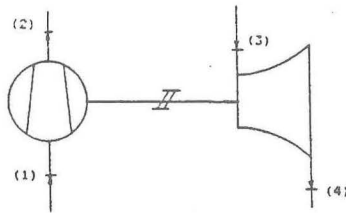


FIG. (4-5).18

$$h_4 = 417.46 + 0.88(2675.5 - 417.46)$$

$$= 2404.54 \text{ KJ/Kg}.$$

$$s_4 = s_3 = 1.3026 + 0.88(7.3594 - 1.3026)$$

$$= 6.632 \text{ KJ/Kg-K}.$$

y con 200 °C, interpolando:

$$h_3 = 2820.82 \text{ KJ/Kg}.$$

$$p_3 = 11.18 \text{ bar}.$$

b) De;

$$\dot{W}_{13,4} = |\dot{W}|_{1,2}$$

$$\dot{m}_v (h_3 - h_4) = \dot{m}_e \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1)$$

$$1 * (2820.82 - 2404.54) = 1 * 1.5482 (T_2 - 564.8)$$

$$\therefore T_2 = 833.68 \text{ K.}$$

y de Poisson:

$$833.68 / 564.8 = (p_2 / 2.56)^{0.1916}$$

$$\therefore P_2 = 19.54 \text{ bares.}$$

PROBLEMA (4-5).17

Los gases: etano, propano y bióxido de carbono se comprimen separadamente desde 0.05 de presión reducida y 2.0 de temperatura reducida, hasta la presión de 2.0 MPa, en forma adiabática y reversible.

Para que la potencia de cada uno de ellos sea la misma e igual a 3 KW, cuál será el flujo de masa en Kg/s que deben comprimir.

Asuma que el comportamiento de estos gases es ideal.

Solución

Los esquemas técnicos serían los siguientes:

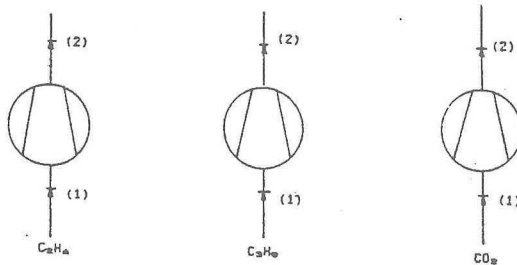


FIG. (4-5).19

De: $T_r = T/T_c$ y $P_r = P/P_c$; se tiene:

$$C_2H_6: T_1 = 611 \text{ K}; P_1 = 0.244 \text{ MPa.}$$

$$C_3H_8: T_1 = 740 \text{ K}; P_1 = 0.213 \text{ MPa.}$$

$$\text{CO}_2: \quad T_1 = 608.4 \text{ K}; P_1 = 0.3695 \text{ MPa.}$$

$$\text{De POISSON: } T_2(\text{C}_2\text{H}_6) = 849.77 \text{ K.}$$

$$T_2(\text{C}_3\text{H}_8) = 950.76 \text{ K.}$$

$$T_2(\text{CO}_2) = 888.43 \text{ K.}$$

Entonces de:

$$\dot{W}_{11.2} = 3 = \dot{m} * C_p * (T_2 - T_1)$$

$$3 = \dot{m}_{\text{C}_2\text{H}_6} * 1.7662 (849.77 - 611);$$

$$\dot{m}_{\text{C}_2\text{H}_6} = 7.11 * 10^{-3} \text{ Kg/s.}$$

$$3 = \dot{m}_{\text{C}_3\text{H}_8} * 1.6794 (950.76 - 740);$$

$$\dot{m}_{\text{C}_3\text{H}_8} = 8.48 * 10^{-3} \text{ Kg/s.}$$

$$3 = \dot{m}_{\text{CO}_2} * 0.8418 (888.43 - 608.4);$$

$$\dot{m}_{\text{CO}_2} = 12.73 * 10^{-3} \text{ Kg/s.}$$

PARTE VI

6. PSICROMETRIA (ESTUDIO DEL AIRE AMBIENTE)

Es el estudio y aplicación del aire ambiente a procesos de calefacción y enfriamiento para un mejor confort en la vida del hombre, o también para su utilización en algunos procesos industriales.

6.1 AIRE AMBIENTE O AIRE HUMEDO.

Es el aire que contiene vapor de agua a presión y temperatura bajas, pudiendo este último condensarse o solidificarse en parte.

El aire ambiente, se comporta como una mezcla de gases ideales y se le aplica por tanto las mismas leyes.

Para la masa de la mezcla se obtendrá:

$$m = m_a(\text{aire seco}) + m_w(\text{vapor recalentado})$$

y la presión total de la mezcla será:

$$P = P_a + P_w$$

Los siguientes casos se pueden presentar para el aire húmedo.

6.1.1 AIRE HUMEDO NO SATURADO

Todo el vapor de agua está recalentado; y en el diagrama (p-v) se puede representar:

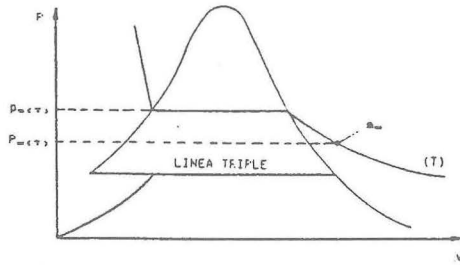


FIG. 6.1

Aquí: $p_{w(T)} < p_{s(T)}$; $t > 0.01$ °C.

6.1.2 AIRE HUMEDO SATURADO CON CONDENSADO LIQUIDO

Una parte del vapor recalentado se satura y la otra parte se condensa (niebla o líquido que se precipita).

Entonces: $m_w = m_w'' + m_w'$

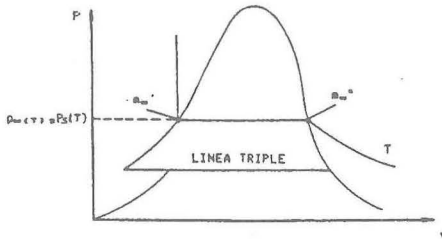


FIG. 6.2

Aquí: $p_{w(T)} = p_{s(T)}$; $t > 0.01$ °C.

6.1.3 AIRE HUMEDO SATURADO CON CONDENSADO SOLIDO

Una parte del vapor recalentado se satura y la otra parte se condensa (escarcha o granizo que se precipita).

Entonces: $m_w = m_w'' + m_i$

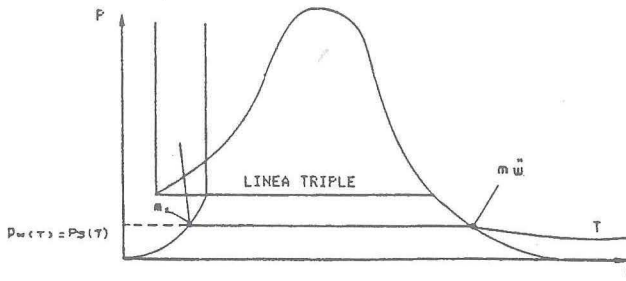


FIG. 6.3

Aquí: $p_{w(T)} = p_{s(T)}$, $t < 0.01$ °C.

6.2 PROPIEDADES DEL AIRE HUMEDO

6.2.1 TEMPERATURA DEL PUNTO DE ROCIO

Para una mezcla gas(aire)-vapor(agua), es la temperatura a la cual el vapor recalentado se condensa (m'_w) o solidifica (m_i) cuando es enfriado a presión constante (1-2).

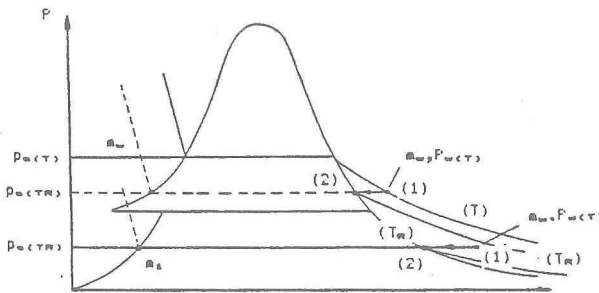


FIG. 6.4

6.2.2 GRADO DE HUMEDAD O HUMEDAD ABSOLUTA

Por definición:

$$x = m_w / m_a; \text{ Kg.vapor agua/Kg.aire seco.}$$

6.2.3 HUMEDAD RELATIVA

Es la relación:

$$\varphi = \frac{P_{w(T)}}{P_{s(T)}} \quad \text{Ó} \quad \varphi = \frac{P_{s(TR)}}{P_{s(T)}}$$

Se demuestra fácilmente que:

$$x = 0.622 \cdot p_{w(T)} / p_a$$

$$\text{ó } x = 0.622 \cdot \varphi \cdot p_{s(T)} / (P - \varphi \cdot p_{s(T)})$$

Cuando el aire está saturado:

$$x = x_s \quad \text{y} \quad \varphi = 1$$

Por consiguiente:

$$x_s = 0.622 \cdot p_{s(T)} / (P - p_{s(T)})$$

Cuando x aumenta por encima de x_s , sólo la parte $m''_w = m_a \cdot x_s$, es vapor de agua; el resto;

$$m'_w = m_w - m''_w = x \cdot m_a - x_s \cdot m_a$$

$$= m_a (x - x_s),$$

se condensará (líquido o sólido).

6.2.4 VOLUMEN ESPECIFICO DEL AIRE HUMEDO

Se puede definir con respecto a la masa total o con respecto a la masa de aire seco solamente.

Es decir: $v = V/m$; m^3/Kg ; $m = m_w + m_a$
 ó $v_x = V/m_a$; m^3/Kg aire seco.

Se puede encontrar la siguiente relación:

$$v_x = v(1+x) = (1+x)/\rho$$

También se puede demostrar que:

$$v_x = 461 \cdot T / P \cdot (0.622 + x)$$

$$\text{ó } v_{x(s)} = 461 \cdot T / P \cdot (0.622 + x_s), \text{ en la saturación.}$$

6.2.5 ENTALPIA ESPECIFICA DEL AIRE HUMEDO

También se puede definir con respecto a la masa total o con respecto a la masa de aire seco solamente.

Es decir:

$$h = H/m = (m_a * h_a + m_w * h_w) / m; \text{ KJ/Kg.}$$

$$\text{ó } h_x = \frac{H}{m_a} = \frac{m_a \cdot h_a + m_w \cdot h_w}{m_a} = h_a + X \cdot h_w; \text{ KJ/Kg. aire se}$$

Según los casos del aire húmedo, también se pueden presentar tres casos.

PRIMER CASO: AIRE HUMEDO NO SATURADO

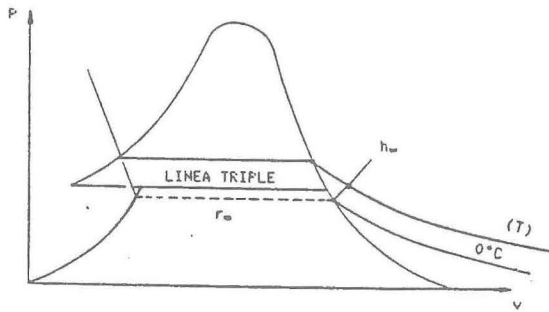


FIG. 6.5

h_w , puede evaluarse con respecto a la temperatura de 0 °C; donde $r_0 \cong 2500 \text{ KJ/Kg.}$

$$h_w = r_0 + C_{pw} \cdot t$$

$$\therefore h_x = h_a + x(r_0 + C_{pw} \cdot t)$$

$$\text{ó } h_x = C_{pa} \cdot t + x(r_0 + C_{pw} \cdot t);$$

$$C_{pa} = 1.004 \text{ KJ/Kg-K.}$$

$$C_{pw} = 1.86 \text{ KJ/Kg-K.}$$

SEGUNDO CASO: AIRE HUMEDO SATURADO

Es decir:

$$h_x = C_{pa} \cdot t + x_s(r_0 + C_{pw} \cdot t) + (x - x_s) \cdot C_w \cdot t$$

$$C_w = 4.186 \text{ KJ/Kg-K.}$$

TERCER CASO: AIRE HUMEDO SATURADO

Es decir:

$$h_x = C_{pa} \cdot t + x_s(r_0 + C_{pw} \cdot t) + (x - x_s)(r_h + Ch \cdot t)$$

$$r_h = -333 \text{ KJ/Kg.}; \text{ Ch} = 2.05 \text{ KJ/Kg-K.}$$

6.3 PROCESO DE SATURACION ADIABATICA

Sea el esquema técnico de la figura siguiente:

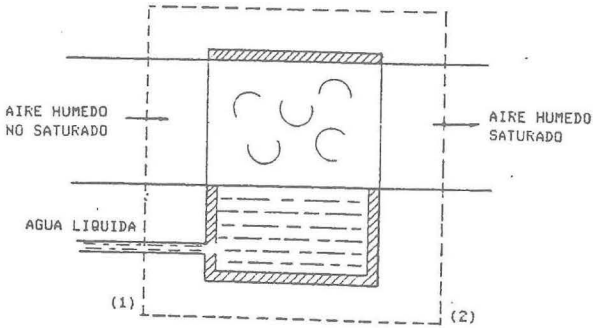


FIG. 6.6

Para que este proceso se lleve a cabo debe tenerse las siguientes consideraciones:

- El proceso debe ser isobárico-estacionario-abierto.
- La cantidad de agua agregada a la temperatura de saturación, debe ser igual a aquella que se evapora.
- El sistema es adiabático.
- Las energías cinéticas y potenciales, son despreciables.

Aquí podemos aplicar la 1ª ley y el balance de masas:

$$\dot{m}_{a1} \cdot h_{a1} + \dot{m}_{w1} \cdot h_{w1} + \dot{m}l_1 \cdot hl_1 = \dot{m}_{a2} \cdot h_{a2} + \dot{m}_{w2} \cdot h_{w2}$$

$$\text{ó } \dot{m}_{a1} \cdot h_{x1} + \dot{m}l_1 \cdot hl_1 = \dot{m}_{a2} \cdot h_{x2} \dots\dots (\alpha)$$

$$\text{y } \dot{m}_{w1} + \dot{m}l_1 = \dot{m}_{w2} \dots\dots (\beta)$$

Se puede asumir que el vapor y el líquido están saturados y tomar los valores de tablas.

6.4 TEMPERATURA DEL BULBO SECO Y TEMPERATURA DEL BULBO HUMEDO

Consideremos la figura siguiente:

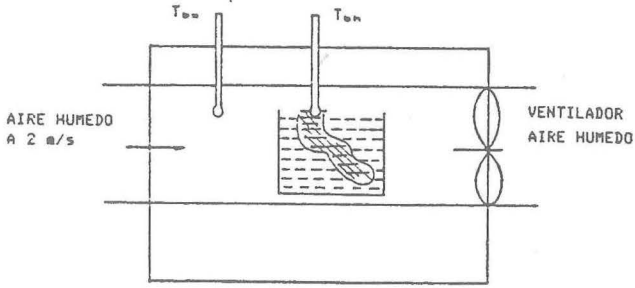


FIG. 6.7

Temperatura del bulbo seco (Tbs). El bulbo del termómetro toma contacto directamente con el aire húmedo que fluye por el ducto, registrándose por consiguiente su temperatura.

Temperatura del bulbo húmedo (Tbh). El bulbo del termómetro, en este caso, está envuelto en una gasa de farmacia (algodón) y sumergido en un pequeño depósito de agua. El aire al ceder su calor al agua para que se evapore, disminuye su temperatura, la cual es registrada por el termómetro.

El conjunto de los dos termómetros constituye el llamado PSICROMETRO; que para fines prácticos se puede fijar en un pequeño soporte giratorio, tal como indica la figura siguiente.

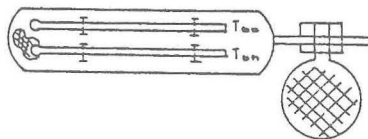


FIG. 6.8

Generalmente: $T_{bs} > T_{bh}$, puede obtenerse como un caso especial: $T_{bs} = T_{bh}$

ASMAN, ha determinado la siguiente relación:

$$P_{w(T)} = P' - 0.5(T_{bs} - T_{bh}) \dots \text{mmHg.}$$

P' , con T_{bh} , de tablas.

sólo vale, cuando $T_{bs} < 40 \text{ }^\circ\text{C}$.

6.5 LA CARTA PSICROMETRICA

Es la graficación de las propiedades del aire húmedo: x , ϕ , v_x , h_x ; y T_{bs} y T_{bh} :

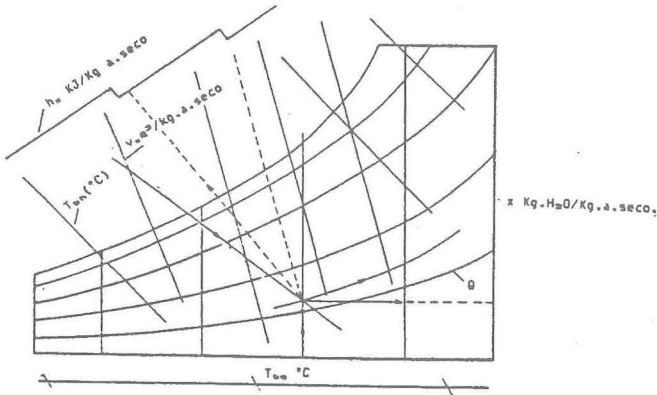


FIG. 6.9

Con T_{bs} y T_{bh} , registradas en el PSICRÓMETRO, se puede hallar en forma gráfica, rápidamente:

x , ϕ , v_x , y h_x .

De esta carta, existen variaciones americanas y europeas con ligera diferencia en su uso.

6.6 PROCESOS DE ACONDICIONAMIENTO DE AIRE

El acondicionamiento del aire usualmente se refiere, al control de su temperatura, humedad, velocidad y limpieza con respecto al polvo, bacterias, olores, etc. Muchas industrias requieren que el aire sea acondicionado para sus procesos y un número cada vez más creciente de instalaciones de aparatos para aire acondicionado en edificios y centros comerciales son solicitados, para un mejor confort humano.

6.6.1 MEZCLA ADIABATICA DE DOS CORRIENTES DE AIRE

Consideremos la siguiente mezcla de dos flujos de aire húmedo:

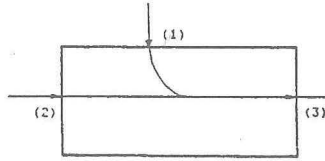


FIG. 6.10

De 1ª ley tenemos:

$$\dot{m}_{a1} \cdot h_{x1} + \dot{m}_{a2} \cdot h_{x2} = \dot{m}_{a3} \cdot h_{x3} \dots\dots\dots(\alpha)$$

Del balance de masas:

$$\dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2} = \dot{m}_{a3} \dots\dots\dots(\beta)$$

$$(\beta) \text{ en } (\alpha) : \dot{m}_{a1} (h_{x1} - h_{x3}) = \dot{m}_{a2} (h_{x3} - h_{x2})$$

$$\therefore \frac{\dot{m}_{a1}}{\dot{m}_{a2}} = \frac{h_{x3} - h_{x2}}{h_{x1} - h_{x3}}$$

También de:

$$\dot{m}_{w1} + \dot{m}_{w2} = \dot{m}_{w3}$$

$$x_1 \cdot \dot{m}_{a1} + x_2 \cdot \dot{m}_{a2} = (\dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2}) \cdot x_3$$

$$\dot{m}_{a1} (x_1 - x_3) = \dot{m}_{a2} (x_3 - x_2)$$

$$\therefore \frac{\dot{m}_{a1}}{\dot{m}_{a2}} = \frac{x_3 - x_2}{x_1 - x_3}$$

En general combinando, estas relaciones:

$$\frac{\dot{m}_{a1}}{\dot{m}_{a2}} = \frac{h_{x3} - h_{x2}}{h_{x1} - h_{x3}} = \frac{x_3 - x_2}{x_1 - x_3}$$

Las que se pueden graficar en la carta psicrométrica; por construcción geométrica:

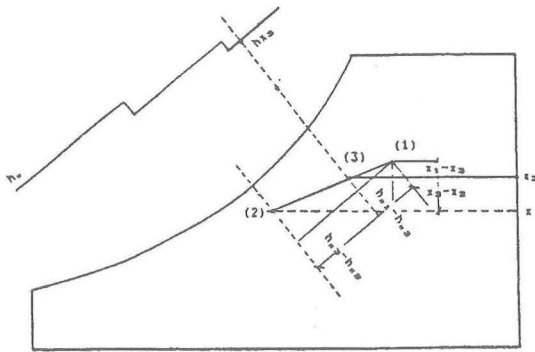


FIG.6.11

6.6.2 CALENTAMIENTO SENSIBLE

Se puede hacer, calentando el aire húmedo con resistencias eléctricas o con bobinas al interior de las cuales circulen gases de combustión calientes o vapor de agua, manteniéndose inalterable la humedad absoluta. Es decir:

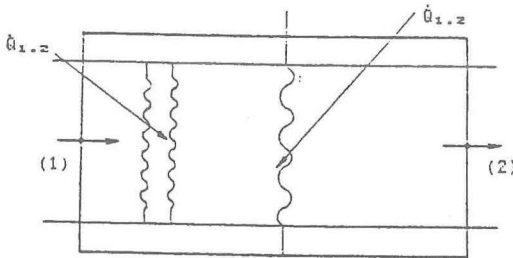


FIG. 6.12

$$x_1 = x_2 \text{ CTE.}; t_2 > t_1$$

6.6.3 ENFRIAMIENTO SENSIBLE

Se realiza con bobinas al interior de las cuales circulan portadores de energía refrigerantes como FREON-12, AMONIACO, etc., manteniéndose inalterable la humedad absoluta. Es decir:

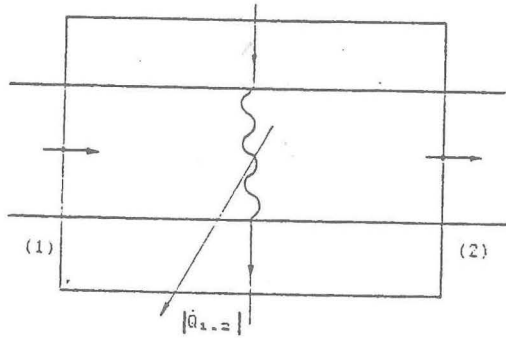


FIG. 6.13

$$x_1 = x_2; \quad t_2 < t_1$$

6.6.4 CALENTAMIENTO Y HUMIDIFICACION

La realización técnica de este proceso, se logra, suministrando vapor de agua al aire húmedo y además calentándolo, con el mismo vapor o separadamente. Es decir:

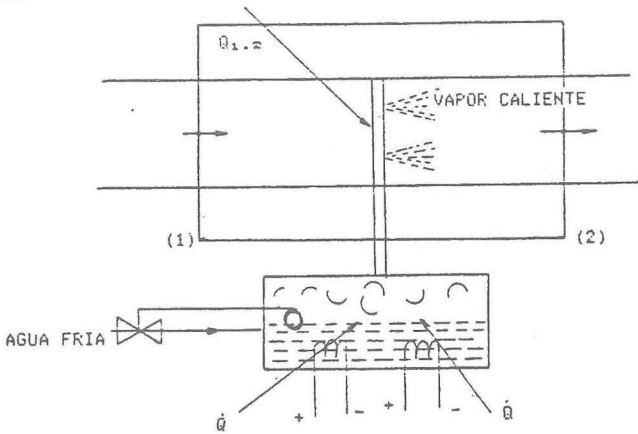


FIG. 6.14

$$x_2 > x_1; \quad t_2 > t_1$$

6.6.5 ENFRIAMIENTO Y DESHUMIDIFICACION

En este proceso, el enfriamiento del aire húmedo debe ser, sensiblemente primero hasta llegar a la saturación y luego bajar por la curva de saturación bajando la humedad absoluta. Es decir:

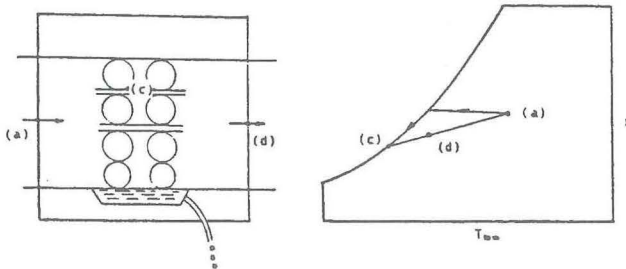


FIG. 6.15

$$x_c < x_a; t_c < t_a$$

Aquí suponemos que todo el aire toma contacto con las bobinas (longitud infinita), logrando el aire enfriar y deshumidificar hasta (c).

En la práctica (termodinámica II-irreversible), sólo una parte del aire toma contacto con la bobina (longitud-finita) y otra parte no toma contacto, logrando enfriar y deshumidificar el aire hasta (d).

GRADO DE AJUSTE

Por definición:

$$B.F. = \frac{t_d - t_c}{t_a - t_c} = 1 - \frac{t_a - t_d}{t_a - t_c}$$

Caso ideal: $t_d = t_c \therefore B.F. = 0$

FACTOR DE CALOR SENSIBLE:

Por definición:

$$S.H.F. = \frac{\dot{Q}_s}{\dot{Q}_s + \dot{Q}_l}$$

Donde:

$$\dot{Q}_s = \dot{m}_a * C_{pa} (t_a - t_c); \dot{Q}_l = \dot{m}_a (x_a - x_c) * r_o$$

6.6.6 ENFRIAMIENTO Y LAVADO POR EVAPORACION O DE SATURACION ADIABATICA

En este proceso se pulveriza agua en gran cantidad al aire húmedo, logrando que éste disminuya su temperatura a causa de ceder su calor al agua para que ésta se evapore en parte, logrando además lavar el aire de impurezas. Es decir:

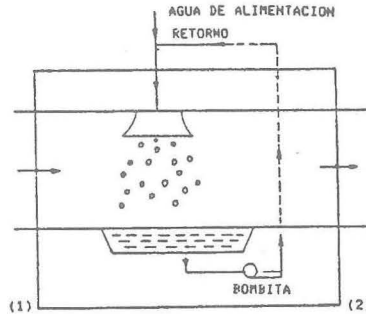


FIG. 6.16

El proceso sigue la dirección de T_{bh} , pudiendo o no llegar a la curva de saturación.

$$x_2 > x_1; t_2 < t_1$$

6.6.7 SECADO QUIMICO (PROCESOS INDUSTRIALES)

En este proceso, al aire húmedo se le deshumidifica intensamente primero y luego se calienta sensiblemente hasta la temperatura requerida. Es decir:

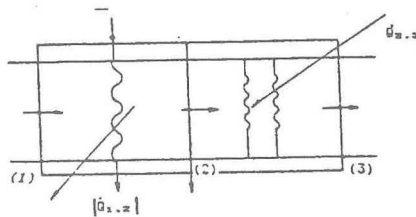


FIG. 6.17

$$x_2 \ll x_1; t_2 < t_1; x_2 = x_3 \cong 0; t_3 > t_2$$

6.6.8 TORRES DE REFRIGERACION

El agua utilizada en procesos tales como de: motores de combustión interna, plantas de refrigeración, centrales de vapor, eléctricos, de destilación, etc., es necesario enfriarla para volverla a utilizar.

Esto se hace pulverizándola en el aire, ya sea en estanques o en las llamadas torres de refrigeración. Es decir:

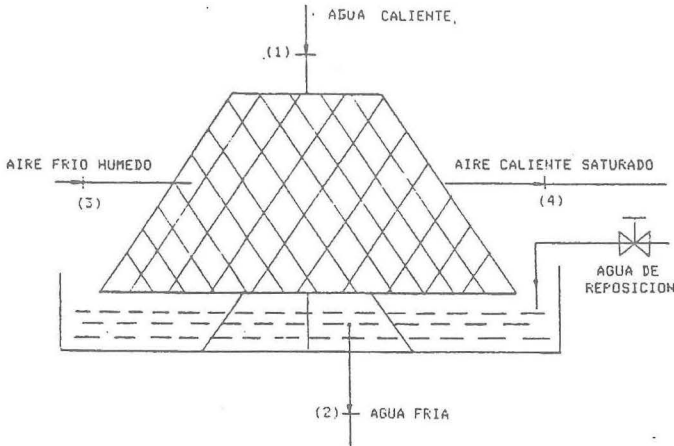


FIG. 6.18

Para el análisis termodinámico, se hace un balance de masas y de energía:

$$\dot{m}_{a3} \cdot h_{x3} + \dot{m}l_1 \cdot hl_1 = \dot{m}_{a4} \cdot h_{x4} + \dot{m}l_2 \cdot hl_2 \dots\dots(\alpha)$$

$$\dot{m}_{w3} + \dot{m}l_1 = \dot{m}_{w4} + \dot{m}l_2 \dots\dots(\beta)$$

La cantidad de agua de reposición es:

$$(\dot{m}l_1 - \dot{m}l_2) = \dot{m}_a (x_4 - x_3)$$

PROBLEMAS DE APLICACION

PROBLEMAS 6.1

Se quiere acondicionar el aire ambiente tal como se indica en el esquema técnico de la figura siguiente:

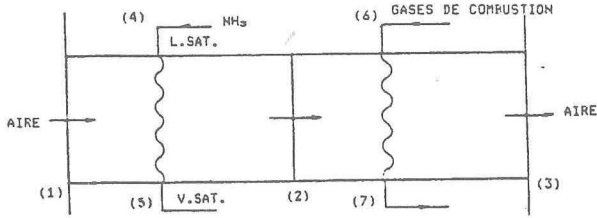


FIG. 6.1

La información técnica complementaria es la siguiente:

$$\begin{aligned}
 t_{bsl} &= 30 \text{ }^{\circ}\text{C}, t_{bhl} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}, \\
 x_2 &= 0.005 \text{ Kg.agua/Kg.air seco.} \\
 t_6 &= 200 \text{ }^{\circ}\text{C}, t_7 = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}.
 \end{aligned}$$

Los gases de combustión están compuestos de:

0.20 H₂O+0.345 CO₂+1.482 N₂, y fluyen en términos de Kmol/ min. cada uno de ellos.

Los intercambios de calor se realizan en forma isobárica-adiabática-ideal.

Se pide:

- Los flujos de masa de amoniaco y aire, en Kg/s.
- Hacer el balance de energía en toda la instalación.

Solución

a) Del balance de energía (1ª ley):

$$\dot{m}_a (x_1 - x_2) \cdot hl_2 - \dot{m}_{gc} \cdot C_{pgc} (t_7 - t_6) = \dot{m}_a (h_{x3} - h_{x2}) + \dot{m}_a (x_1 - x_2) \cdot hl_2$$

De;

$$\frac{h_{x3} - h_{x1}}{h_{x6} - h_{x1}} = 1; \therefore h_{x3} = h_{x6}; t_6 = t_3$$

De la mezcla de gases se obtiene:

$$C_{pm} = 1.0410 \text{ KJ/Kg-K.}$$

$$C_{vm} = 0.7615 \text{ KJ/Kg-K.}$$

$$R_m = 0.2795 \text{ KJ/Kg-K.}$$

$$M_m = 29.7470 \text{ Kg/Kmol.}$$

Luego:

$$\dot{m}_m = \dot{n}_x * M_m = 2.027 * 29.7470 = 1.0050 \text{ Kg/s.}$$

De carta: $x_1 = 0.0104 \text{ Kg.H}_2\text{O/Kg.a.seco.}$

$$t_2 = 4 \text{ }^\circ\text{C} \quad hl_2 = 16.78 \text{ KJ/Kg.}$$

$$h_{x6} = C_{pa} \cdot t_6 + x_3(r_o + C_{pw} \cdot t_6) = h_{x3}$$
$$= 1.004 * 200 + 0.005(2500 + 1.86 * 200)$$

$$- h_{x3} = 215.16 \text{ KJ/Kg.a.seco.}$$

$$h_{x2} = 1.004 * 4 + 0.005(2500 + 1.86 * 4)$$
$$= 16.55 \text{ KJ/Kg.a.seco.}$$

reemplazando:

$$- 1.0050 * 1.410 (80 - 200) = \dot{m}_a (215.16 - 16.55)$$

$$\therefore \dot{m}_a = 0.6321 \text{ Kg/s.}$$

Del balance de energía (1ª ley):

$$- \dot{m}_a (h_{x2} - h_{x1}) = \dot{m}_{NH3} (h_5 - h_4) + \dot{m}_a (x_1 - x_2) \cdot hl_2$$

$$De; \frac{h_5 - h_4}{h_1 - h_4} = 1 \quad \therefore h_5 = h_4; \text{ con } t_1 = 30^\circ\text{C,}$$

de tablas: $h' = 322.9 \text{ KJ/Kg.}$

$$h'' = 1467.9 \text{ KJ/Kg.}$$

y como:

$$h_{x1} = 1.004 * 30 + 0.0104(2500 + 1.86 * 30)$$
$$= 56.70 \text{ KJ/Kg.a.seco.}$$

reemplazando:

$$- 0.6321 (16.55 - 56.70) = \dot{m}_{NH3} (1467.9 - 322.9) +$$

$$+ 0.6321 (0.0104 - 0.005) 16.78$$

$$\therefore \dot{m}_{NH3} = 0.0221 \text{ kg/s.}$$

b) Del balance de energía en toda la instalación:

$$\dot{H}_{x1} + \dot{Q}_{6.7} = |\dot{Q}_{4.5}| + \dot{H}_{x3} + \dot{H}l_2$$

$$0.6321 \cdot 56.70 + 1.0050 \cdot 1.0410(200 - 80) =$$

$$0.0221(1467.9 - 322.9) + 0.6321 \cdot 215.16 + 0.06$$

$$\therefore 161.4 = 161.4 \text{ LO CUAL ES CORRECTO!}$$

PROBLEMA 6.2

En un secador rotativo, fruta entra con 90% de humedad y 25°C y sale con un 30% de humedad, si el aire para su secado entra a 50°C de t_{bs} y 21°C de t_{bh} ; y sale saturado, cuál será el flujo de masa de aire seco utilizado para una capacidad del secador de 1000 Kg/hr. y un calor específico de la fruta seca de 1.9674 KJ/Kg-K.

El intercambio de calor se realiza adiabática-isobárica-ideal con la presión del aire constante e igual a 1 bar.

Solución

Podemos esquematizar el proceso con la figura siguiente:

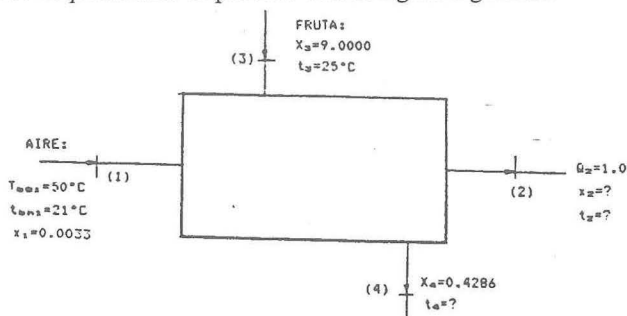


FIG. 6.2

$$De: \eta_{ic} = \frac{\dot{Q}_{3,4}}{\dot{Q}_{3,1}} = \frac{\dot{m} \cdot C_p \cdot (t_4 - t_3)}{\dot{m} \cdot C_p (t_1 - t_3)} = 1; t_4 = t_1 = 50^\circ\text{C}$$

Del balance de energía y del balance de masas:

$$\frac{C_{pa} (t_{a1} - t_{a2}) + x_1 \cdot h_{w1} - x_2 \cdot h_{w2}}{(x_1 - x_2)} = [C_f (t_4 - t_3) + x_4 \cdot h_{w4} - x_3 \cdot h_{w3}] / (x_4 - x_3)$$

con: 25 °C; $h'_{w3} = h_{w3} = 104.89 \text{ KJ/Kg.}$
 50 °C; $h'_{w4} = h_{w4} = 209.33 \text{ KJ/Kg.}$
 50 °C; $h''_{w1} = h_{w1} = 2592.1 \text{ KJ/Kg.}$

Reemplazando:

$$\frac{1.0035 (50 - t_{a2}) + 8.55 - x_2 \cdot h_{w2}}{(0.0033 - x_2)} = 93.93$$

Asumiendo:

$$t_{a2} = 20.528 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$h''_{w2} = h_{w2} = 2539.06096 \text{ KJ/Kg.}$$

$$P_{s(ta2)} = 2.426648 \text{ KPa.}$$

$$x_2 = 0.015469131 \text{ Kg.H}_2\text{O/Kg.a.seco.}$$

Reemplazando se obtiene: $94.66 = 93.94$,

se puede hacer un ligero ajuste para hallar el valor de t_{a2} exacto; pero puede considerarse que lo asumido $20.528 \text{ }^\circ\text{C}$ para t_{a2} es correcto.

Con esta temperatura se calcula $x_2 = 0.015469131$ y reemplazando en la ecuación del balance de masas:

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{m}_F (x_4 - x_3)}{(x_1 - x_2)} = 0.2778 * \frac{(0.4286 - 9.0000)}{(0.0033 - 0.01546913)}$$

$$\therefore \dot{m}_a = 195.67 \text{ kg/s.}$$

PROBLEMA 6.3

Reproduzca la curva de 100% de humedad relativa, para el rango de temperaturas del aire húmedo de -10°C a $30 \text{ }^\circ\text{C}$, dividido de 5 en 5 grados y para una presión barométrica de 1.01325 bares.

Para la graficación de la curva, la escala a considerar queda a su criterio, y la expresión correspondiente debe usted desarrollarla (demostrarla paso a paso).

Solución:

$$\text{De; } x = m_w/m_a; \text{ y } P_w \cdot V = m_w R_w T$$

$$P_a \cdot V = m_a R_a T$$

$$\frac{m_w}{m_a} = \frac{P_w \cdot R_a}{P_a \cdot R_w} = \frac{0.287 * P_w}{0.46152 (P - P_w)} \text{ y como } \varphi = \frac{P_w}{P_s}$$

$$\frac{m_w}{m_a} = 0.622 * \frac{\varphi * P_{s(t)}}{P - \varphi * P_{s(t)}}$$

$$\text{Es decir: } x = 0.622 * \frac{\varphi * P_{s(t)}}{P - \varphi * P_{s(t)}}$$

Aquí: $\varphi = 1.0$;

$P = 101.325 \text{ KPa} = 1.01325 \text{ bar}$.

t_{bs} (°C)	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30
$P_{s(t)}$ KPa	0.2602	0.4032	0.6108	0.8721	1.2276	1.7051	2.339	3.169	4.246
x Kg H ₂ O	0.0016	0.0024	0.0038	0.0054	0.0076	0.0106	0.0147	0.0201	0.0272

Kg.a.s

Se grafica t_{bs} vs. x

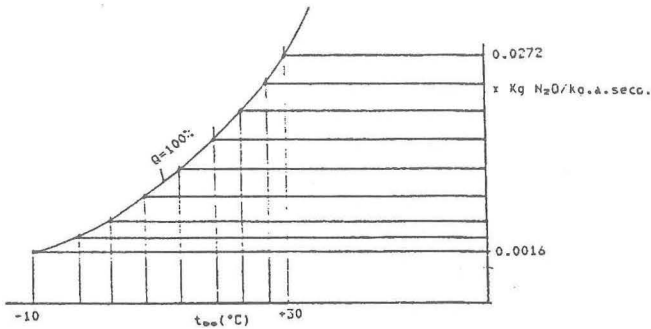


FIG. 6.3

PROBLEMA 6.4

El aire húmedo no saturado se halla a 30°C de t_{bs} , 20°C de t_{bn} , y 1 bar de presión. Se pide:

- Evaluar utilizando las cartas psicrometricas IHVE y de CARRIER: h_x , v_x , x , φ , y t_R .
- Evaluar lo mismo que la parte (a), pero utilizando las expresiones analíticas y las tablas de vapor de agua.

Solución

a) *DE CARTA IHVE:*

$$h_x = 57; x = 0.0104; \phi = 38.5\%$$

$$v_x = 0.873; t_R = 14.6 \text{ }^\circ\text{C}.$$

DE CARTA DE CARRIER:

$$h_x = 57.5 - 0.35 = 57.15; x = 0.0106$$

$$v_x = 0.875; \phi = 40\%; t_R = 14.6 \text{ }^\circ\text{C}.$$

b) $De; P_w = P' - 0.5(t_{bs} - t_{bh})$

$$\therefore P_w = 0.01682 \text{ bar}; p_{s(30)} = 0.04246 \text{ bar}$$

$$\phi = 0.01682/0.04246 = 0.3961 \rightarrow 39.61\%;$$

$$x = 0.622 * \frac{0.3961 * 0.04246}{1 - 0.3961 * 0.04246}$$

$$x = 0.0106;$$

$$h_x = 1.0035 * 30 + 0.0106(2500 + 1.86 * 30) \\ = 57.20$$

$$v_x = [461 * 303 / (1 * 10^5)] * [0.622 + 0.0106] \\ = 0.8836$$

De tablas y con 0.01682 bar, interpolando:

$$t_R = 14.76 \text{ }^\circ\text{C}$$

PROBLEMA 6.5

Considere que el aire húmedo se calienta sensiblemente desde 10°C de t_{bs} y 7°C de t_{bh} hasta 28.5°C de t_{bs} , mediante una resistencia eléctrica de 3KW, luego se deshumidifica mediante un proceso de saturación adiabática hasta -5°C de t_{bs} utilizando FREON-12 que entra como líquido saturado a 28.5°C y sale como vapor saturado a la misma temperatura. Un 50% de flujo de masa que entra antes del primer calentamiento, se mezcla con 20% de flujo de masa después del proceso de saturación adiabático, y el resto, se vuelve a calentar sensiblemente hasta 60°C de t_{bs} .

Considerar que todo el proceso es isobárico y adiabático (1 bar). Se pide:

- Evaluar el flujo de masa de FREON-12 utilizado; y los KW necesarios para el último calentamiento.
- Evaluar: h_x , x , y la temperatura, después de mezclar los dos flujos de masa de aire húmedo (50% y 20%).

Solución

a) Según el problema, el esquema técnico sería:

b) Para la mezcla 1-3-5, se puede escribir:

$$\frac{\% \dot{m}_{a,3}}{\% \dot{m}_{a,1}} = \frac{h_{x5} - h_{x1}}{h_{x3} - h_{x5}} = \frac{x_5 - x_1}{x_3 - x_5} ;$$

reemplazando valores:

$$\frac{0.20 * 0.15789}{0.15789} = \frac{h_{x5} - 22.5}{1 - h_{x5}} = \frac{x_5 - 0.005}{0.0024 - x_5} ;$$

De donde se obtiene:

$$h_5 = 18.92 \text{ KJ/Kg.a.seco.}$$

$$x_5 = 0.0045 \text{ Kg.H}_2\text{O/Kg.a.seco.}$$

Es decir:

$$18.92 = 1.0035 * t_5 + 0.0045(2500 + 1.86t_5)$$

$$\therefore t_6 = 7.6 \text{ } ^\circ\text{C.}$$

PROBLEMA 6.6

El bagazo de caña de azúcar tipo II que contiene 55% de humedad pasa a través de un secador rotativo y adiabático, donde la humedad se reduce a cero. La capacidad del secador es de 2 toneladas por hora de bagazo seco.

El bagazo entra a 20°C y sale a 95°C, mientras que el aire entra a 95°C y humedad absoluta de 0.002 Kg.agua/Kg.a.seco, y sale saturado y 30°C de temperatura.

Considerando que el proceso se lleva a cabo a la presión de 1 bar, que se desprecian las energías cinéticas y potenciales, se pide calcular el calor específico del bagazo seco en KJ/Kg-K, aproximadamente; y el flujo de masa de aire seco en Kg/s.

Solución:

El esquema técnico para el proceso de secado del bagazo será el siguiente:

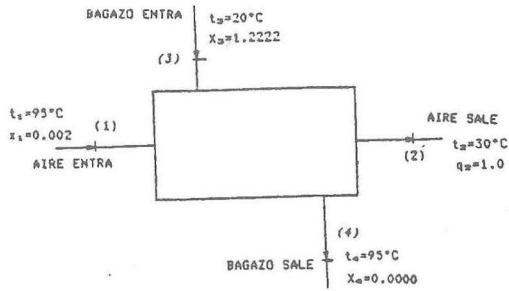


FIG. 6.5

Del balance de masas y energía se tiene:

$$\frac{C_{pa} (t_{a.1} - t_{a.2}) + x_1 \cdot h_{w1} - x_2 \cdot h_{w2}}{(x_1 - x_2)} =$$

$$= \frac{C_B (t_{B4} - t_{B3}) + x_{B4} \cdot h_{w4} - x_{B3} \cdot h_{w3}}{(x_{B4} - x_{B3})}$$

De tablas y con:

20°C; $h_{w3} = h'_{w3} = 83.96 \text{ KJ/Kg.}$

95°C; $h_{w4} = h'_{w4} = 397.96 \text{ KJ/Kg.}$

95°C; $h_{w1} = h''_{w1} = 2668.1 \text{ KJ/Kg.}$

30°C; $h_{w2} = h''_{w2} = 2556.3 \text{ KJ/Kg.}$

Además con:

$$x_2 = 0.622 * \frac{\varphi_2 * P_s(t_2)}{P - \varphi_2 * P_s(t_2)}$$

Con $t_2 = 30^\circ\text{C.}$

$p_s(t_2) = 4.246 \text{ KP}_a$

$\therefore x_2 = 0.0276$

Reemplazando:

$C_B = 103.847/75 = 1.3745 \text{ KJ/Kg-K}$

y con:

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{m}_B (x_{B4} - x_{B3})}{(x_1 - x_2)} = \frac{2000}{3600} \left(\frac{0.0000 - 1.2222}{0.002 - 0.0276} \right)$$

$\therefore \dot{m}_a = 26.52 \text{ Kg/s.}$

PROBLEMA 6.7

La información técnica de un acondicionamiento de aire, que se muestra en la figura siguiente es :

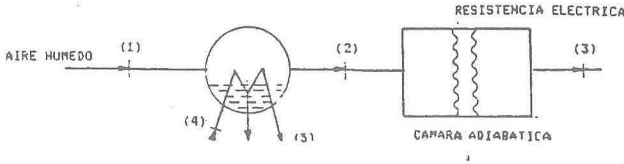


FIG. 6.6

$p_1 = p_2 = p_3 = 1.5 \text{ bar}$; $p_4 = p_5 = 2 \text{ bar}$; $t_1 = 80^\circ\text{C}$, $\phi_1 = 80\%$, $t_4 = 20^\circ\text{C}$, $t_3 = 50^\circ\text{C}$,
 $\phi_3 = 90\%$, $\dot{Q}_{2,3} = 1.5 \text{ KW}$,

(2-3): calentamiento sensible,

(1-2): enfriamiento y deshumidificación (intercambiador de calor ideal).

Se pide, evaluar los flujos de masa de aire seco y de agua en Kg/s, además dibujar el proceso completo en la carta psicrométrica.

Solución:

$$\text{De; } \dot{Q}_{2,3} = 1.5 = \dot{m}_a (h_{x3} - h_{x2})$$

$$x_3 = 0.622 * \frac{0.90 * 0.12349}{1.5 - 0.90 * 0.12349} =$$

$$= 0.0498 \text{ Kg.H}_2\text{O /Kg.a.s.}$$

$$h_{x3} = 1.0035 * 50 + 0.0498(2500 + 1.86 * 50) =$$

$$= 179.3064 \text{ KJ/Kg.a.s.}$$

$$x_2 = x_3 = 0.0498$$

$$= 0.622 * p_s(t) / (1.5 - 1 * p_s(t_2))$$

$$\therefore p_s(t_2) = 0.1112 \text{ bar.}$$

e interpolando: $t_2 = 47.77^\circ\text{C}$.

$$h_{x2} = 1.0035 * 47.77 + 0.0498(2500 + 1.86 * 47.77) =$$

$$h_{x2} = 176.86 \text{ KJ/Kg.a.s.}$$

$$\therefore \dot{m}_a = \frac{1.5}{2.45} = 0.6122 \text{ Kg/s.}$$

$$\text{De; } \eta_{i.c} = 1 = \frac{\dot{Q}_{4,5}}{\dot{Q}_{4,1}}; t_5 = t_1 = 80^\circ\text{C}$$

$$\text{Luego: } \dot{m}_{ag} = \frac{\dot{m}_a (h_{x1} - h_{x2}) - \dot{m}_l \cdot hl}{C_{pag} (t_5 - t_4)} ;$$

$$x_1 = 0.622 * \frac{0.80 * 0.4739}{1.5 - 0.80 * 0.4739} =$$

$$= 0.2104 \text{ Kg.H}_2\text{O/Kg.a.s.}$$

$$h_{x1} = 1.0035 * 80 + 0.2104 (2500 + 1.86 * 80) = 637.59 \text{ KJ/Kg.a.s.}$$

$$\therefore \dot{m}_{ag} = [0.6122 (637.59 - 176.86) - 0.6122 (0.2104 - 0.0498) * 200.02] / 4.186 (80 - 20)$$

$$\therefore \dot{m}_{ag} = 1.0448 \text{ Kg/s.}$$

El proceso del aire en la carta será:

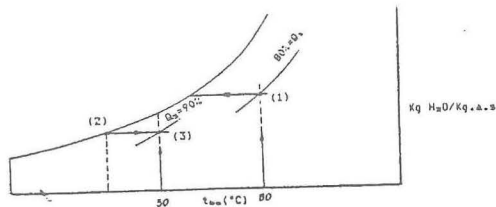


FIG. 6.7

PROBLEMA 6.8

Un proceso de acondicionamiento de aire se lleva a cabo tal como se indica en la figura siguiente; y con su correspondiente información técnica:

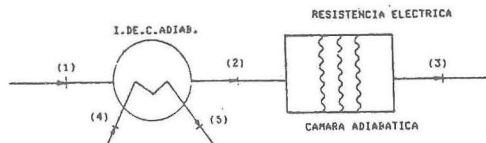


FIG. 6.8

$$t_{bs1} = 25^\circ\text{C}, t_{bh1} = 23^\circ\text{C}, t_4 = 18^\circ\text{C},$$

$$t_2 = 0^\circ\text{C}, t_3 = 50^\circ\text{C}.$$

$$p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = p_5 = 1 \text{ bar.}$$

El intercambio de calor es ideal;

$$Q_{2,3} = 1.5 \text{ KW.}$$

- Utilizando la carta psicrométrica, evaluar los flujos de masa de aire seco y de agua, en Kg/s.
- Graficar el proceso completo en la carta psicrométrica.
- Evaluar el flujo de masa de agua condensada, en Kg/s.
- Hacer el balance de energía (térmico) en toda la instalación.

Solución:

a) De carta se obtiene: $x_1 = 0.0169$;
 $x_2 = x_3 = 0.0037$; $h_{x1} = 68.5$; $h_{x2} = 9.5$;
 $h_{x3} = 60$

De; $\eta_{i.c} = 1$; $t_5 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$;

$$\dot{Q}_{2,3} = 1.5 = \dot{m}_a (h_{x3} - h_{x2}) \therefore \dot{m}_a = \frac{1.5}{50.5} = 0.02970 \text{ Kg/s.}$$

De 1ª ley:

$$\dot{m}_{ag} = \frac{\dot{m}_a (h_{x1} - h_{x2}) - (x_1 - x_2) \cdot \dot{m}_a \cdot h_{12}}{(h_{15} - h_{14})}$$

con: $t_5 = 25^\circ\text{C}$; $h_{15} = 104.89$
 $t_2 = 0^\circ\text{C}$; $h_{12} = 0.000$
 $t_4 = 18^\circ\text{C}$; $h_{14} = 75.572$

$$\therefore \dot{m}_{ag} = \frac{0.02970 (68.5 - 9.5)}{104.89 - 75.572} = 0.059768742 \text{ Kg/s}$$

- b) Con la información dada se puede graficar el proceso en la carta:

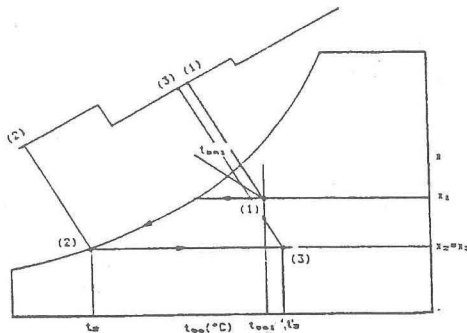


FIG. 6.9

c) El flujo de condensado será:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{l2} &= \dot{m}_a (x_1 - x_2) = 0.02970 (0.0169 - 0.0037) \\ &= 3.9204 \cdot 10^{-4} \text{ Kg/s.} \end{aligned}$$

d) De 1ª ley:

$$\dot{m}_a h_{x1} + \dot{H}_4 + \dot{Q}_{2,3} = \dot{H}_5 + \dot{H}l_2 + \dot{m}_a \cdot h_{x3}$$

$$\begin{aligned} 0.02970 \cdot 68.5 + 0.059768742 \cdot 75.572 + 1.5 &= \\ = 0.059768742 \cdot 104.89 + 0.02970 \cdot 60 & \\ 8.051 &\equiv 8.051 \end{aligned}$$

LO CUAL ES CORRECTO!

PROBLEMA 6.9

El esquema técnico que se muestra a continuación, corresponde a un proceso para el almacenamiento del aire en el depósito, en el tiempo de 10 minutos y previa deshumidificación en el intercambiador de calor:

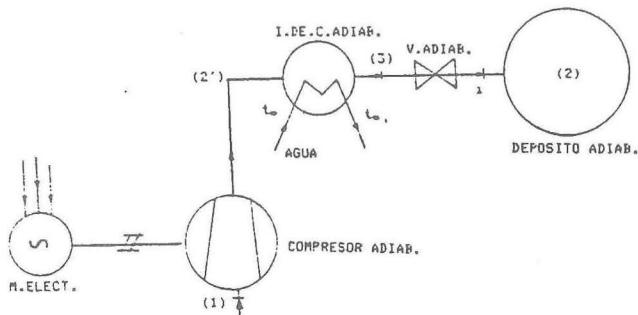


FIG. 6.10

La información técnica adicional es la siguiente:

$$\begin{aligned} p_1 &= 1 \text{ bar; } t_{bs1} = 20^\circ\text{C; } t_{bh1} = 19^\circ\text{C;} \\ t_3 &= 0^\circ\text{C; } t_c = 18^\circ\text{C.} \end{aligned}$$

Al momento de llenarse el depósito con aire:

$p_2 = p_3 = p_i = p_e = 5 \text{ bar}$, se cierra la válvula y el compresor se para. Al inicio el depósito está vacío.

En el intercambiador de calor que es ideal:

$$\dot{m}_{\text{agua}} = 0.0025 \text{ Kg/s}; C_p = 4.186 \text{ KJ/Kg-K.}$$

Para el compresor utilizar: $K = 1.3973$

Considere: despreciable la cantidad de vapor de agua en el depósito,

$$\dot{W}_{v.c.}, \Delta \dot{E}_c, \Delta \dot{E}_p, \text{ iguales a cero}(0).$$

Se pide:

- La potencia del compresor en KW.
- El volumen en metros cúbicos del depósito de almacenamiento y el flujo de masa de agua condensado en Kg/s en el intercambiador de calor.

Solución

$$\text{a) De } \eta_{i.c} = 1 = (t_s - t_e) / (t_2 - t_e)$$

$$\therefore t_s = t_2$$

De 1ª ley; en el intercambiador de calor:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{a.3} (x_2 - x_3) * C_p l_3 \cdot t_3 + \dot{m}_{ag} \cdot C_{pag} \cdot (t_s - t_e) = \\ = \dot{m}_a (h_{x2'} - h_{x3'}) \end{aligned}$$

$$\text{De; } P_{w1} = p' - 0.5 (t_{bs} - t_{bh}) = 16.81 - 0.5 =$$

$$= 16.31 \text{ mmHg} \rightarrow 2.146 \text{ KPa.}$$

$$\text{A } 20^\circ\text{C}; p_s(t_1) = 2.339 \text{ Kpa}$$

$$\therefore \phi_1 = 2.146/2.339 = 0.92$$

y entonces:

$$x_1 = x_2 = 0.622 * 0.92 * 2.339 / (100 - 0.92 * 2.339) = 0.0136 \text{ KgH}_2\text{O/Kg.a.s.}$$

$$x_3 = 0.622 * 1 * 0.6113 / (500 - 1 * 0.6113)$$

$$= 0.00076 \text{ KgH}_2\text{O/Kg.a.s.}$$

$$T_2 = 293 (5)^{\frac{0.3973}{1.3973}} = 463.03 \rightarrow 190.03^\circ\text{C}$$

$$h_{x1} = 1.0035 * 20 + 0.0136 (2500 + 1.86 * 20)$$

$$= 54.58 \text{ KJ/Kg.a.s.}$$

$$h_{x2'} = 1.0035 * 190.03 + 0.0136 * (2500 + 1.86 * 190.03)$$

$$= 229.50 \text{ KJ/Kg.a.s.}$$

$$h_{x_3} = 1.0035 \cdot (0) + 0.0076(2500 + 1.86(0)) \\ = 1.90 \text{ KJ/Kg.a.s.}$$

$$\therefore \dot{m}_a = \frac{\dot{m}_{ag} \cdot C_{pag} (t_s - t_e)}{(h_{x_2'} - h_{x_3})} = \frac{0.0025 * 4.186 (190.03 - 18)}{(229.50 - 1.90)} = 0.00791 \text{ Kg/s.}$$

$$\text{y } \dot{W}_{11,2'} = \dot{m}_a (h_{x_2'} - h_{x_1'}) = 0.00791 (229.50 - 54.58) = - 1.3836 \text{ KW.}$$

b) Como $t = 10 \text{ min.} = 600 \text{ s.}$

$$\therefore m_2 = 0.00791 * 600 = 4.746 \text{ Kg.}$$

De ecuacion USUF: $m_1 \cdot h_1 = m_2 \cdot u_2$

$$C_{pi} \cdot T_1 = C_{v2} \cdot T_2 \quad \therefore \quad T_2 = K \cdot T_1$$

Pero como en la válvula: $t_3 = 0 = t_1$

$$\therefore T_2 = 1.3973(273) = 382.2 \text{ K}$$

$$\text{Entonces: } V_2 = m_2 \cdot R_2 \cdot T_2 / P_2 \\ = (4.746 * 287 * 382.2) / (5 * 10^5) \\ = 1.04119 \text{ m}^3$$

y el flujo de condensado será:

$$\dot{m}l_3 = \dot{m}_a (x_2' - x_3) = 0.00791 (0.0136 - 0.00076) = \\ = 1.015644 * 10^{-4}$$

$$\therefore \dot{m}l_3 = 1.015644 * 10^{-4} \text{ Kg/s.}$$

APENDICE

TABLAS DE PROPIEDADES TERMODINAMICAS

PARA EL AGUA (H_2O); A.1:

Vapor húmedo	A.1.1 y A.1.2
Vapor sobrecalentado	A.1.3
Líquido comprimido	A.1.4
Sólido-vapor saturado	A.1.5

PARA EL AMONIACO (NH_3); A.2:

Vapor húmedo	A.2.1
Vapor sobrecalentado	A.2.2

PARA EL FREON-12 (CCl_2F_2); A.3:

Vapor húmedo	A.3.1
Vapor sobrecalentado	A.3.2

PARA EL OXIGENO (O_2); A.4:

Vapor húmedo	A.4.1
Vapor sobrecalentado	A.4.2

PARA EL NITROGENO (N_2); A.5:

Vapor húmedo	A.5.1
Vapor sobrecalentado	A.5.2

PARA EL MERCURIO (H_g); A.6:

Vapor húmedo	A.6
--------------------	-----

CONSTANTES CRITICAS; A.7

PROPIEDADES DE VARIOS GASES IDEALES; A.8

CALORES ESPECIFICOS A PRESION CONSTANTE

PARA VARIOS GASES IDEALES; A.9

PROPIEDADES TERMODINAMICAS DEL AIRE A BAJA PRESION: A.10

DIAGRAMAS DE ESTADO Y CARTAS

Carta generalizada de compresibilidad	FIG. A.5
Carta generalizada para la corrección de la Entalpía	FIG. A.6
Carta generalizada para la Corrección de la Entropía	FIG. A.8
Carta generalizada para bajas presiones	FIG. A.9
Carta Psicrométrica, Carrier Corporation.....	FIG. A.10
Carta Psicrométrica, IHVE	FIG. A.11
Diagrama Presión-Entalpia para el Freón-12	FIG. A.12

Table A.1
Thermodynamic Properties of Steam*
Table A.1.1
Saturated Steam: Temperature Table

Temp. °C <i>T</i>	Press. kPa <i>P</i>	Specific Volume		Internal Energy			Enthalpy			Entropy		
		Sat. Liquid <i>v_f</i>	Sat. Vapor <i>v_g</i>	Sat. Liquid <i>u_f</i>	Evap. <i>u_{fg}</i>	Sat. Vapor <i>u_g</i>	Sat. Liquid <i>h_f</i>	Evap. <i>h_{fg}</i>	Sat. Vapor <i>h_g</i>	Sat. Liquid <i>s_f</i>	Evap. <i>s_{fg}</i>	Sat. Vapor <i>s_g</i>
0.01	0.6113	0.001 000	206.14	.00	2375.3	2375.3	.01	2501.3	2501.4	.0000	9.1562	9.1562
5	0.8721	0.001 000	147.12	20.97	2361.3	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	.0761	8.9496	9.0257
10	1.2276	0.001 000	106.38	42.00	2347.2	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	.1510	8.7498	8.9008
15	1.7051	0.001 001	77.93	62.99	2333.1	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	.2245	8.5569	8.7814
20	2.339	0.001 002	57.79	83.95	2319.0	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	.2966	8.3706	8.6672
25	3.169	0.001 003	43.36	104.88	2304.9	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	.3674	8.1905	8.5580
30	4.246	0.001 004	32.89	125.78	2290.8	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	.4369	8.0164	8.4533
35	5.628	0.001 006	25.22	146.67	2276.7	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	.5053	7.8478	8.3531
40	7.384	0.001 008	19.52	167.56	2262.6	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	.5725	7.6845	8.2570
45	9.593	0.001 010	15.26	188.44	2248.4	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	.6387	7.5261	8.1648
50	12.349	0.001 012	12.03	209.32	2234.2	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	.7038	7.3725	8.0763
55	15.758	0.001 015	9.568	230.21	2219.9	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	.7679	7.2234	7.9913
60	19.940	0.001 017	7.671	251.11	2205.5	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	.8312	7.0784	7.9096
65	25.03	0.001 020	6.197	272.02	2191.1	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	.8935	6.9375	7.8310
70	31.19	0.001 023	5.042	292.95	2176.6	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	.9549	6.8004	7.7553
75	38.58	0.001 026	4.131	313.90	2162.0	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	6.6669	7.6824
80	47.39	0.001 029	3.407	334.86	2147.4	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	6.5369	7.6122
85	57.83	0.001 033	2.828	355.84	2132.6	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	6.4102	7.5445
90	70.14	0.001 036	2.361	376.85	2117.7	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	6.2866	7.4791
95	84.55	0.001 040	1.982	397.88	2102.7	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	6.1659	7.4159

*Adapted from Joseph H. Keenan, Frederick G. Keyes, Philip G. Hill, and Joan G. Moore, *Steam Tables*, (New York: John Wiley & Sons, Inc., 1969).

Table A.1.1 (Continued)
Saturated Steam: Temperature Table

Temp. °C <i>T</i>	Press. MPa <i>P</i>	Specific Volume		Internal Energy			Enthalpy			Entropy		
		Sat. Liquid <i>v_f</i>	Sat. Vapor <i>v_g</i>	Sat. Liquid <i>u_f</i>	Evap. <i>u_{fg}</i>	Sat. Vapor <i>u_g</i>	Sat. Liquid <i>h_f</i>	Evap. <i>h_{fg}</i>	Sat. Vapor <i>h_g</i>	Sat. Liquid <i>s_f</i>	Evap. <i>s_{fg}</i>	Sat. Vapor <i>s_g</i>
100	0.101 35	0.001 044	1.6729	418.94	2087.6	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	6.0480	7.3549
105	0.120 82	0.001 048	1.4194	440.02	2072.3	2512.4	440.15	2243.7	2683.8	1.3630	5.9328	7.2958
110	0.143 27	0.001 052	1.2102	461.14	2057.0	2518.1	461.30	2230.2	2691.5	1.4185	5.8202	7.2387
115	0.169 06	0.001 056	1.0366	482.30	2041.4	2523.7	482.48	2216.5	2699.0	1.4734	5.7100	7.1833
120	0.198 53	0.001 060	0.8919	503.50	2025.8	2529.3	503.71	2202.6	2706.3	1.5276	5.6020	7.1296
125	0.2321	0.001 065	0.7706	524.74	2009.9	2534.6	524.99	2188.5	2713.5	1.5813	5.4962	7.0775
130	0.2701	0.001 070	0.6685	546.02	1993.9	2539.9	546.31	2174.2	2720.5	1.6344	5.3925	7.0269
135	0.3130	0.001 075	0.5822	567.35	1977.7	2545.0	567.69	2159.6	2727.3	1.6870	5.2907	6.9777
140	0.3613	0.001 080	0.5089	588.74	1961.3	2550.0	589.13	2144.7	2733.9	1.7391	5.1908	6.9299
145	0.4154	0.001 085	0.4463	610.18	1944.7	2554.9	610.63	2129.6	2740.3	1.7907	5.0926	6.8833
150	0.4758	0.001 091	0.3928	631.68	1927.9	2559.5	632.20	2114.3	2746.5	1.8418	4.9960	6.8379
155	0.5431	0.001 096	0.3468	653.24	1910.8	2564.1	653.84	2098.6	2752.4	1.8925	4.9010	6.7935
160	0.6178	0.001 102	0.3071	674.87	1893.5	2568.4	675.55	2082.6	2758.1	1.9427	4.8075	6.7502
165	0.7005	0.001 108	0.2727	696.56	1876.0	2572.5	697.34	2066.2	2763.5	1.9925	4.7153	6.7078
170	0.7917	0.001 114	0.2428	718.33	1858.1	2576.5	719.21	2049.5	2768.7	2.0419	4.6244	6.6663
175	0.8920	0.001 121	0.2168	740.17	1840.0	2580.2	741.17	2032.4	2773.6	2.0909	4.5347	6.6256
180	1.0021	0.001 127	0.194 05	762.09	1821.6	2583.7	763.22	2015.0	2778.2	2.1396	4.4461	6.5857
185	1.1227	0.001 134	0.174 09	784.10	1802.9	2587.0	785.37	1997.1	2782.4	2.1879	4.3586	6.5465
190	1.2544	0.001 141	0.156 54	806.19	1783.8	2590.0	807.62	1978.8	2786.4	2.2359	4.2720	6.5079
195	1.3978	0.001 149	0.141 05	828.37	1764.4	2592.8	829.98	1960.0	2790.0	2.2835	4.1863	6.4698
200	1.5538	0.001 157	0.127 36	850.65	1744.7	2595.3	852.45	1940.7	2793.2	2.3309	4.1014	6.4323
205	1.7230	0.001 164	0.115 21	873.04	1724.5	2597.5	875.04	1921.0	2796.0	2.3780	4.0172	6.3952
210	1.9062	0.001 173	0.104 41	895.53	1703.9	2599.5	897.76	1900.7	2798.5	2.4248	3.9337	6.3585

215	2.104	0.001 181	0.094 79	918.14	1682.9	2601.1	920.62	1879.9	2800.5	2.4714	3.8507	6.3221
220	2.318	0.001 190	0.086 19	940.87	1661.5	2602.4	943.62	1858.5	2802.1	2.5178	3.7683	6.2861
225	2.548	0.001 199	0.078 49	963.73	1639.6	2603.3	966.78	1836.5	2803.3	2.5639	3.6863	6.2503
230	2.795	0.001 209	0.071 58	986.74	1617.2	2603.9	990.12	1813.8	2804.0	2.6099	3.6047	6.2146
235	3.060	0.001 219	0.065 37	1009.89	1594.2	2604.1	1013.62	1790.5	2804.2	2.6558	3.5233	6.1791
240	3.344	0.001 229	0.059 76	1033.21	1570.8	2604.0	1037.32	1766.5	2803.8	2.7015	3.4422	6.1437
245	3.648	0.001 240	0.054 71	1056.71	1546.7	2603.4	1061.23	1741.7	2803.0	2.7472	3.3612	6.1083
250	3.973	0.001 251	0.050 13	1080.39	1522.0	2602.4	1085.36	1716.2	2801.5	2.7927	3.2802	6.0730
255	4.319	0.001 263	0.045 98	1104.28	1496.7	2600.9	1109.73	1689.8	2799.5	2.8383	3.1992	6.0375
260	4.688	0.001 276	0.042 21	1128.39	1470.6	2599.0	1134.37	1662.5	2796.9	2.8838	3.1181	6.0019
265	5.081	0.001 289	0.038 77	1152.74	1443.9	2596.6	1159.28	1634.4	2793.6	2.9294	3.0368	5.9662
270	5.499	0.001 302	0.035 64	1177.36	1416.3	2593.7	1184.51	1605.2	2789.7	2.9751	2.9551	5.9301
275	5.942	0.001 317	0.032 79	1202.25	1387.9	2590.2	1210.07	1574.9	2785.0	3.0208	2.8730	5.8938
280	6.412	0.001 332	0.030 17	1227.46	1358.7	2586.1	1235.99	1543.6	2779.6	3.0668	2.7903	5.8571
285	6.909	0.001 348	0.027 77	1253.00	1328.4	2581.4	1262.31	1511.0	2773.3	3.1130	2.7070	5.8199
290	7.436	0.001 366	0.025 57	1278.92	1297.1	2576.0	1289.07	1477.1	2766.2	3.1594	2.6227	5.7821
295	7.993	0.001 384	0.023 54	1305.2	1264.7	2569.9	1316.3	1441.8	2758.1	3.2062	2.5375	5.7437
300	8.581	0.001 404	0.021 67	1332.0	1231.0	2563.0	1344.0	1404.9	2749.0	3.2534	2.4511	5.7045
305	9.202	0.001 425	0.019 98	1359.3	1195.9	2555.2	1372.4	1366.4	2738.7	3.3010	2.3633	5.6643
310	9.856	0.001 447	0.018 35	1387.1	1159.4	2546.4	1401.3	1326.0	2727.3	3.3493	2.2737	5.6230
315	10.547	0.001 472	0.016 867	1415.5	1121.1	2536.6	1431.0	1283.5	2714.5	3.3982	2.1821	5.5804
320	11.274	0.001 499	0.015 488	1444.6	1080.9	2525.5	1461.5	1238.6	2700.1	3.4480	2.0882	5.5362
330	12.845	0.001 561	0.012 996	1505.3	993.7	2498.9	1525.3	1140.6	2665.9	3.5507	1.8909	5.4417
340	14.586	0.001 638	0.010 797	1570.3	894.3	2464.6	1594.2	1027.9	2622.0	3.6594	1.6763	5.3357
350	16.513	0.001 740	0.008 813	1641.9	776.6	2418.4	1670.6	893.4	2563.9	3.7777	1.4335	5.2112
360	18.651	0.001 893	0.006 945	1725.2	626.3	2351.5	1760.5	720.5	2481.0	3.9147	1.1379	5.0526
370	21.03	0.002 213	0.004 925	1844.0	384.5	2228.5	1890.5	441.6	2332.1	4.1106	0.6865	4.7971
374.14	22.09	0.003 155	0.003 155	2029.6	0	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	0	4.4298

Table A.1.2
Saturated Steam: Pressure Table

Press. kPa <i>P</i>	Temp. °C <i>T</i>	Specific Volume		Internal Energy			Enthalpy			Entropy		
		Sat. Liquid <i>v_f</i>	Sat. Vapor <i>v_g</i>	Sat. Liquid <i>u_f</i>	Evap. <i>u_{fg}</i>	Sat. Vapor <i>u_g</i>	Sat. Liquid <i>h_f</i>	Evap. <i>h_{fg}</i>	Sat. Vapor <i>h_g</i>	Sat. Liquid <i>s_f</i>	Evap. <i>s_{fg}</i>	Sat. Vapor <i>s_g</i>
0.6113	0.01	0.001 000	206.14	.00	2375.3	2375.3	.01	2501.3	2501.4	.0000	9.1562	9.1562
1.0	6.98	0.001 000	129.21	29.30	2355.7	2385.0	29.30	2484.9	2514.2	.1059	8.8697	8.9756
1.5	13.03	0.001 001	87.98	54.71	2338.6	2393.3	54.71	2470.6	2525.3	.1957	8.6322	8.8279
2.0	17.50	0.001 001	67.00	73.48	2326.0	2399.5	73.48	2460.0	2533.5	.2607	8.4629	8.7237
2.5	21.08	0.001 002	51.25	88.48	2315.9	2404.4	88.49	2451.6	2540.0	.3120	8.3311	8.6432
3.0	24.08	0.001 003	45.67	101.04	2307.5	2408.5	101.05	2444.5	2545.5	.3545	8.2231	8.5776
4.0	28.96	0.001 004	34.80	121.45	2293.7	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	.4226	8.0520	8.4746
5.0	32.88	0.001 005	28.19	137.81	2282.7	2420.5	137.82	2423.7	2561.5	.4764	7.9187	8.3951
7.5	40.29	0.001 008	19.24	168.78	2261.7	2430.5	168.79	2406.0	2574.8	.5764	7.6750	8.2515
10	45.81	0.001 010	14.67	191.82	2246.1	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	.6493	7.5009	8.1502
15	53.97	0.001 014	10.02	225.92	2222.8	2448.7	225.94	2373.1	2599.1	.7549	7.2536	8.0085
20	60.06	0.001 017	7.649	251.38	2205.4	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	.8320	7.0766	7.9085
25	64.97	0.001 020	6.204	271.90	2191.2	2463.1	271.93	2346.3	2618.2	.8931	6.9383	7.8314
30	69.10	0.001 022	5.229	289.20	2179.2	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	.9439	6.8247	7.7686
40	75.87	0.001 027	3.993	317.53	2159.5	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	6.6441	7.6700
50	81.33	0.001 030	3.240	340.44	2143.4	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	6.5029	7.5939
75	91.78	0.001 037	2.217	384.31	2112.4	2496.7	384.39	2278.6	2663.0	1.2130	6.2434	7.4564
MPa												
0.100	99.63	0.001 043	1.6940	417.36	2088.7	2506.1	417.46	2258.0	2675.5	1.3026	6.0568	7.3594
0.125	105.99	0.001 048	1.3749	444.19	2069.3	2513.5	444.32	2241.0	2685.4	1.3740	5.9104	7.2844
0.150	111.37	0.001 053	1.1593	466.94	2052.7	2519.7	467.11	2226.5	2693.6	1.4336	5.7897	7.2233
0.175	116.06	0.001 057	1.0036	486.80	2038.1	2524.9	486.99	2213.6	2700.6	1.4849	5.6868	7.1717
0.200	120.23	0.001 061	0.8857	504.49	2025.0	2529.5	504.70	2201.9	2706.7	1.5301	5.5970	7.1271
0.225	124.00	0.001 064	0.7933	520.47	2013.1	2533.6	520.72	2191.3	2712.1	1.5706	5.5173	7.0878

0.250	127.44	0.001 067	0.7187	535.10	2002.1	2537.2	535.37	2181.5	2716.9	1.6072	5.4455	7.0527
0.275	130.60	0.001 070	0.6573	548.59	1991.9	2540.5	548.89	2172.4	2721.3	1.6408	5.3801	7.0209
0.300	133.55	0.001 073	0.6058	561.15	1982.4	2543.6	561.47	2163.8	2725.3	1.6718	5.3201	6.9919
0.325	136.30	0.001 076	0.5620	572.90	1973.5	2546.4	573.25	2155.8	2729.0	1.7006	5.2646	6.9652
0.350	138.88	0.001 079	0.5243	583.95	1965.0	2548.9	584.33	2148.1	2732.4	1.7275	5.2130	6.9405
0.375	141.32	0.001 081	0.4914	594.40	1956.9	2551.3	594.81	2140.8	2735.6	1.7528	5.1647	6.9175
0.40	143.63	0.001 084	0.4625	604.31	1949.3	2553.6	604.74	2133.8	2738.6	1.7766	5.1193	6.8959
0.45	147.93	0.001 088	0.4140	622.77	1934.9	2557.6	623.25	2120.7	2743.9	1.8207	5.0359	6.8565
0.50	151.86	0.001 093	0.3749	639.68	1921.6	2561.2	640.23	2108.5	2748.7	1.8607	4.9606	6.8213
0.55	155.48	0.001 097	0.3427	655.32	1909.2	2564.5	655.93	2097.0	2753.0	1.8973	4.8920	6.7893
0.60	158.85	0.001 101	0.3157	669.90	1897.5	2567.4	670.56	2086.3	2756.8	1.9312	4.8288	6.7600
0.65	162.01	0.001 104	0.2927	683.56	1886.5	2570.1	684.28	2076.0	2760.3	1.9627	4.7703	6.7331
0.70	164.97	0.001 108	0.2729	696.44	1876.1	2572.5	697.22	2066.3	2763.5	1.9922	4.7158	6.7080
0.75	167.78	0.001 112	0.2556	708.64	1866.1	2574.7	709.47	2057.0	2766.4	2.0200	4.6647	6.6847
0.80	170.43	0.001 115	0.2404	720.22	1856.6	2576.8	721.11	2048.0	2769.1	2.0462	4.6166	6.6628
0.85	172.96	0.001 118	0.2270	731.27	1847.4	2578.7	732.22	2039.4	2771.6	2.0710	4.5711	6.6421
0.90	175.38	0.001 121	0.2150	741.83	1838.6	2580.5	742.83	2031.1	2773.9	2.0946	4.5280	6.6226
0.95	177.69	0.001 124	0.2042	751.95	1830.2	2582.1	753.02	2023.1	2776.1	2.1172	4.4869	6.6041
1.00	179.91	0.001 127	0.1944	761.68	1822.0	2583.6	762.81	2015.3	2778.1	2.1387	4.4478	6.5865
1.10	184.09	0.001 133	0.1775 53	780.09	1806.3	2586.4	781.34	2000.4	2781.7	2.1792	4.3744	6.5536
1.20	187.99	0.001 139	0.1633 33	797.29	1791.5	2588.8	798.65	1986.2	2784.8	2.2166	4.3067	6.5233
1.30	191.64	0.001 144	0.1512 85	813.44	1777.5	2591.0	814.93	1972.7	2787.6	2.2515	4.2438	6.4953
1.40	195.07	0.001 149	0.1408 84	828.70	1764.1	2592.8	830.30	1959.7	2790.0	2.2842	4.1850	6.4693
1.50	198.32	0.001 154	0.1317 77	843.16	1751.3	2594.5	844.89	1947.3	2792.2	2.3150	4.1298	6.4448
1.75	205.76	0.001 166	0.1134 49	876.46	1721.4	2597.8	878.50	1917.9	2796.4	2.3851	4.0044	6.3896
2.00	212.42	0.001 177	0.0996 63	906.44	1693.8	2600.3	908.79	1890.7	2799.5	2.4474	3.8935	6.3409
2.25	218.45	0.001 187	0.0888 75	933.83	1668.2	2602.0	936.49	1865.2	2801.7	2.5035	3.7937	6.2972
2.5	223.99	0.001 197	0.0798 98	959.11	1644.0	2603.1	962.11	1841.0	2803.1	2.5547	3.7028	6.2575
3.0	233.90	0.001 217	0.0666 68	1004.78	1599.3	2604.1	1008.42	1795.7	2804.2	2.6457	3.5412	6.1869

Table A.1.2 (Continued)
Saturated Steam: Pressure Table

Press. MPa <i>P</i>	Temp. °C <i>T</i>	Specific Volume		Internal Energy			Enthalpy			Entropy		
		Sat. Liquid <i>v_f</i>	Sat. Vapor <i>v_g</i>	Sat. Liquid <i>u_f</i>	Evap. <i>u_{fg}</i>	Sat. Vapor <i>u_g</i>	Sat. Liquid <i>h_f</i>	Evap. <i>h_{fg}</i>	Sat. Vapor <i>h_g</i>	Sat. Liquid <i>s_f</i>	Evap. <i>s_{fg}</i>	Sat. Vapor <i>s_g</i>
3.5	242.60	0.001 235	0.057 07	1045.43	1558.3	2603.7	1049.75	1753.7	2803.4	2.7253	3.4000	6.1253
4	250.40	0.001 252	0.019 78	1082.31	1520.0	2602.3	1087.31	1714.1	2801.4	2.7964	3.2737	6.0701
5	263.99	0.001 286	0.039 44	1147.81	1449.3	2597.1	1154.23	1640.1	2794.3	2.9202	3.0532	5.9734
6	275.64	0.001 319	0.032 44	1205.44	1384.3	2589.7	1213.35	1571.0	2784.3	3.0267	2.8625	5.8892
7	285.88	0.001 351	0.027 37	1257.55	1323.0	2580.5	1267.00	1505.1	2772.1	3.1211	2.6922	5.8133
8	295.06	0.001 384	0.023 52	1305.57	1264.2	2569.8	1316.64	1441.3	2758.0	3.2068	2.5364	5.7432
9	303.40	0.001 418	0.020 48	1350.51	1207.3	2557.8	1363.26	1378.9	2742.1	3.2858	2.3915	5.6772
10	311.06	0.001 452	0.018 026	1393.04	1151.4	2544.4	1407.56	1317.1	2724.7	3.3596	2.2544	5.6141
11	318.15	0.001 489	0.015 987	1433.7	1096.0	2529.8	1450.1	1255.5	2705.6	3.4295	2.1233	5.5527
12	324.75	0.001 527	0.014 263	1473.0	1040.7	2513.7	1491.3	1193.6	2684.9	3.4962	1.9962	5.4924
13	330.93	0.001 567	0.012 780	1511.1	985.0	2496.1	1531.5	1130.7	2662.2	3.5606	1.8718	5.4323
14	336.75	0.001 611	0.011 485	1548.6	928.2	2476.8	1571.1	1066.5	2637.6	3.6232	1.7485	5.3717
15	342.24	0.001 658	0.010 337	1585.6	869.8	2455.5	1610.5	1000.0	2610.5	3.6848	1.6249	5.3098
16	347.44	0.001 711	0.009 306	1622.7	809.0	2431.7	1650.1	930.6	2580.6	3.7461	1.4994	5.2455
17	352.37	0.001 770	0.008 364	1660.2	744.8	2405.0	1690.3	856.9	2547.2	3.8079	1.3698	5.1777
18	357.06	0.001 840	0.007 489	1698.9	675.4	2374.3	1732.0	777.1	2509.1	3.8715	1.2329	5.1044
19	361.54	0.001 924	0.006 657	1739.9	598.1	2338.1	1776.5	688.0	2464.5	3.9388	1.0839	5.0228
20	365.81	0.002 036	0.005 834	1785.6	507.5	2293.0	1826.3	583.4	2409.7	4.0139	0.9130	4.9269
21	369.89	0.002 207	0.004 952	1842.1	388.5	2230.6	1888.4	446.2	2334.6	4.1075	0.6938	4.8013
22	373.80	0.002 742	0.003 568	1961.9	125.2	2087.1	2022.2	143.4	2165.6	4.3110	0.2216	4.5327
22.09	374.14	0.003 155	0.003 155	2029.6	0	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	0	4.4298

Table A.1.3
Superheated Vapor

<i>T</i>	<i>P</i> = .010 MPa (45.81)				<i>P</i> = .050 MPa (81.33)				<i>P</i> = .10 MPa (99.63)			
	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
Sat.	14.674	2437.9	2584.7	8.1502	3.240	2483.9	2645.9	7.5939	1.6940	2506.1	2675.5	7.3594
50	14.869	2443.9	2592.6	8.1749								
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4179	3.418	2511.6	2682.5	7.6947	1.6958	2506.7	2676.2	7.3614
150	19.512	2587.9	2783.0	8.6882	3.889	2585.6	2780.1	7.9401	1.9364	2582.8	2776.4	7.6134
200	21.825	2661.3	2879.5	8.9038	4.356	2659.9	2877.7	8.1580	2.172	2658.1	2875.3	7.8343
250	24.136	2736.0	2977.3	9.1002	4.820	2735.0	2976.0	8.3556	2.406	2733.7	2974.3	8.0333
300	26.445	2812.1	3076.5	9.2813	5.284	2811.3	3075.5	8.5373	2.639	2810.4	3074.3	8.2158
400	31.063	2968.9	3279.6	9.6077	6.209	2968.5	3278.9	8.8642	3.103	2967.9	3278.2	8.5435
500	35.679	3132.3	3489.1	9.8978	7.134	3132.0	3488.7	9.1546	3.565	3131.6	3488.1	8.8342
600	40.295	3302.5	3705.4	10.1608	8.057	3302.2	3705.1	9.4178	4.028	3301.9	3704.7	9.0976
700	44.911	3479.6	3928.7	10.4028	8.981	3479.4	3928.5	9.6599	4.490	3479.2	3928.2	9.3398
800	49.526	3663.8	4159.0	10.6281	9.904	3663.6	4158.9	9.8852	4.952	3663.5	4158.6	9.5652
900	54.141	3855.0	4396.4	10.8396	10.828	3854.9	4396.3	10.0967	5.414	3854.8	4396.1	9.7767
1000	58.757	4053.0	4640.6	11.0393	11.751	4052.9	4640.5	10.2964	5.875	4052.8	4640.3	9.9764
1100	63.372	4257.5	4891.2	11.2287	12.674	4257.4	4891.1	10.4859	6.337	4257.3	4891.0	10.1659
1200	67.987	4467.9	5147.8	11.4091	13.597	4467.8	5147.7	10.6662	6.799	4467.7	5147.6	10.3463
1300	72.602	4683.7	5409.7	11.5811	14.521	4683.6	5409.6	10.8382	7.260	4683.5	5409.5	10.5183
	<i>P</i> = .20 MPa (120.23)				<i>P</i> = .30 MPa (133.55)				<i>P</i> = .40 MPa (143.63)			
Sat.	.8857	2529.5	2706.7	7.1272	.6058	2543.6	2725.3	6.9919	.4625	2553.6	2738.6	6.8959
150	.9596	2576.9	2768.8	7.2795	.6339	2570.8	2761.0	7.0778	.4708	2564.5	2752.8	6.9299
200	1.0803	2654.4	2870.5	7.5066	.7163	2650.7	2865.6	7.3115	.5342	2646.8	2860.5	7.1706
250	1.1988	2731.2	2971.0	7.7086	.7964	2728.7	2967.6	7.5166	.5951	2726.1	2964.2	7.3789
300	1.3162	2808.6	3071.8	7.8926	.8753	2806.7	3069.3	7.7022	.6548	2804.8	3066.8	7.5662
400	1.5493	2966.7	3276.6	8.2218	1.0315	2965.6	3275.0	8.0330	.7726	2964.4	3273.4	7.8985

Table A.1.3 (Continued)
Superheated Vapor

<i>T</i>	<i>P</i> = .20 MPa (120.23)				<i>P</i> = .30 MPa (133.55)				<i>P</i> = .40 MPa (143.63)			
	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
500	1.7814	3130.8	3487.1	8.5133	1.1867	3130.0	3486.0	8.3251	.8893	3129.2	3484.9	8.1913
600	2.013	3301.4	3704.0	8.7770	1.3414	3300.8	3703.2	8.5892	1.0055	3300.2	3702.4	8.4558
700	2.244	3478.8	3927.6	9.0194	1.4957	3478.4	3927.1	8.8319	1.1215	3477.9	3926.5	8.6987
800	2.475	3663.1	4158.2	9.2449	1.6499	3662.9	4157.8	9.0576	1.2372	3662.4	4157.3	8.9244
900	2.706	3854.5	4395.8	9.4566	1.8041	3854.2	4395.4	9.2692	1.3529	3853.9	4395.1	9.1362
1000	2.937	4052.5	4640.0	9.6563	1.9581	4052.3	4639.7	9.4690	1.4685	4052.0	4639.4	9.3360
1100	3.168	4257.0	4890.7	9.8458	2.1121	4256.8	4890.4	9.6585	1.5840	4256.5	4890.2	9.5256
1200	3.399	4467.5	5147.3	10.0262	2.2661	4467.2	5147.1	9.8389	1.6996	4467.0	5146.8	9.7060
1300	3.630	4683.2	5409.3	10.1982	2.4201	4683.0	5409.0	10.0110	1.8151	4682.8	5408.8	9.8780
	<i>P</i> = .50 MPa (151.86)				<i>P</i> = .60 MPa (158.85)				<i>P</i> = .80 MPa (170.43)			
Sat.	.3749	2561.2	2748.7	6.8213	.3157	2567.4	2756.8	6.7600	.2404	2576.8	2769.1	6.6628
200	.4249	2642.9	2855.4	7.0592	.3520	2638.9	2850.1	6.9665	.2608	2630.6	2839.3	6.8158
250	.4744	2723.5	2960.7	7.2709	.3938	2720.9	2957.2	7.1816	.2931	2715.5	2950.0	7.0384
300	.5226	2802.9	3064.2	7.4599	.4344	2801.0	3061.6	7.3724	.3241	2797.2	3056.5	7.2328
350	.5701	2882.6	3167.7	7.6329	.4742	2881.2	3165.7	7.5464	.3544	2878.2	3161.7	7.4089
400	.6173	2963.2	3271.9	7.7938	.5137	2962.1	3270.3	7.7079	.3843	2959.7	3267.1	7.5716
500	.7109	3128.4	3483.9	8.0873	.5920	3127.6	3482.8	8.0021	.4433	3126.0	3480.6	7.8673
600	.8041	3299.6	3701.7	7.3522	.6697	3299.1	3700.9	8.2674	.5018	3297.9	3699.4	8.1333
700	.8969	3477.5	3925.9	8.5952	.7472	3477.0	3925.3	8.5107	.5601	3476.2	3924.2	8.3770
800	.9896	3662.1	4156.9	8.8211	.8245	3661.8	4156.5	8.7367	.6181	3661.1	4155.6	8.6033
900	1.0822	3853.6	4394.7	9.0329	.9017	3853.4	4394.4	8.9486	.6761	3852.8	4393.7	8.8153
1000	1.1747	4051.8	4639.1	9.2328	.9788	4051.5	4638.8	9.1485	.7340	4051.0	4638.2	9.0153

1100	1.2672	4256.3	4889.9	9.4224	1.0559	4256.1	4889.6	9.3381	.7919	4255.6	4889.1	9.2050
1200	1.3596	4466.8	5146.6	9.6029	1.1330	4466.5	5146.3	9.5185	.8497	4466.1	5145.9	9.3855
1300	1.4521	4682.5	5408.6	9.7749	1.2101	4682.3	5408.3	9.6906	.9076	4681.8	5407.9	9.5575

	$P = 1.00 \text{ MPa (179.91)}$				$P = 1.20 \text{ MPa (187.99)}$				$P = 1.40 \text{ MPa (195.07)}$			
Sat.	.194 44	2588.6	2778.1	6.5865	.163 33	2588.8	2784.8	6.5233	.140 84	2592.8	2790.0	6.4693
200	.2060	2621.9	2827.9	6.6940	.169 30	2612.8	2815.9	6.5898	.143 02	2603.1	2803.3	6.4975
250	.2327	2709.9	2942.6	6.9247	.192 34	2704.2	2935.0	6.8294	.163 50	2698.3	2927.2	6.7467
300	.2579	2793.2	3051.2	7.1229	.2138	2789.2	3045.8	7.0317	.182 28	2785.2	3040.4	6.9534
350	.2825	2875.2	3157.7	7.3011	.2345	2872.2	3153.6	7.2121	.2003	2869.2	3149.5	7.1360
400	.3066	2957.3	3263.9	7.4651	.2548	2954.9	3260.7	7.3774	.2178	2952.5	3257.5	7.3026
500	.3541	3124.4	3478.5	7.7622	.2946	3122.8	3476.3	7.6759	.2521	3121.1	3474.1	7.6027
600	.4011	3296.8	3697.9	8.0290	.3339	3295.6	3696.3	7.9435	.2860	3294.4	3694.8	7.8710
700	.4478	3475.3	3923.1	8.2731	.3729	3474.4	3922.0	8.1881	.3195	3473.6	3920.8	8.1160
800	.4943	3660.4	4154.7	8.4996	.4118	3659.7	4153.8	8.4148	.3528	3659.0	4153.0	8.3431
900	.5407	3852.2	4392.9	8.7118	.4505	3851.6	4392.2	8.6272	.3861	3851.1	4391.5	8.5556
1000	.5871	4050.5	4637.6	8.9119	.4892	4050.0	4637.0	8.8274	.4192	4049.5	4636.4	8.7559
1100	.6335	4255.1	4888.6	9.1017	.5278	4254.6	4888.0	9.0172	.4524	4254.1	4887.5	8.9457
1200	.6798	4465.6	5145.4	9.2822	.5665	4465.1	5144.9	9.1977	.4855	4464.7	5144.4	9.1262
1300	.7261	4681.3	5407.4	9.4543	.6051	4680.9	5407.0	9.3698	.5186	4680.4	5406.5	9.2984

	$P = 1.60 \text{ MPa (201.41)}$				$P = 1.80 \text{ MPa (207.15)}$				$P = 2.00 \text{ MPa (212.42)}$			
Sat.	.123 80	2596.0	2794.0	6.4218	.110 42	2598.4	2797.1	6.3794	.099 63	2600.3	2799.5	6.3409
225	.132 87	2644.7	2857.3	6.5518	.116 73	2636.6	2846.7	6.4808	.103 77	2628.3	2835.8	6.4147
250	.141 84	2692.3	2919.2	6.6732	.124 97	2686.0	2911.0	6.6066	.111 44	2679.6	2902.5	6.5453
300	.158 62	2781.1	3034.8	6.8844	.140 21	2776.9	3029.2	6.8226	.125 47	2772.6	3023.5	6.7664
350	.174 56	2866.1	3145.4	7.0694	.154 57	2863.0	3141.2	7.0100	.138 57	2859.8	3137.0	6.9563
400	.190 05	2950.1	3254.2	7.2374	.168 47	2947.7	3250.9	7.1794	.151 20	2945.2	3247.6	7.1721
500	.2203	3119.5	3472.0	7.5390	.195 50	3117.9	3469.8	7.4825	.175 68	3116.2	3467.6	7.4317
600	.2500	3293.3	3693.2	7.8080	.2220	3292.1	3691.7	7.7523	.199 60	3290.9	3690.1	7.7024
700	.2794	3472.7	3919.7	8.0535	.2482	3471.8	3918.5	7.9983	.2232	3470.9	3917.4	7.9487

Table A.1.3 (Continued)
Superheated Vapor

T	v	u	h	s	v	u	h	s	v	u	h	s
	$P = 1.60 \text{ MPa (201.41)}$				$P = 1.80 \text{ MPa (207.15)}$				$P = 2.00 \text{ MPa (212.42)}$			
800	.3086	3658.3	4152.1	8.2808	.2742	3657.6	4151.2	8.2258	.2467	3657.0	4150.3	8.1765
900	.3377	3850.5	4390.8	8.4935	.3001	3849.9	4390.1	8.4386	.2700	3849.3	4389.4	8.3895
1000	.3668	4043.0	4635.8	8.6938	.3260	4048.5	4635.2	8.6391	.2933	4048.0	4634.6	8.5901
1100	.3958	4253.7	4887.0	8.8837	.3518	4253.2	4886.4	8.8290	.3166	4252.7	4885.9	8.7800
1200	.4248	4464.2	5143.9	9.0643	.3776	4463.7	5143.4	9.0096	.3398	4463.3	5142.9	8.9607
1300	.4538	4679.9	5406.0	9.2364	.4034	4679.5	5405.6	9.1818	.3631	4679.0	5405.1	9.1329
	$P = 2.50 \text{ MPa (223.99)}$				$P = 3.00 \text{ MPa (233.90)}$				$P = 3.50 \text{ MPa (242.60)}$			
Sat.	.079 98	2603.1	2803.1	6.2575	.066 68	2604.1	2804.2	6.1869	.057 07	2603.7	2803.4	6.1253
225	.080 27	2605.6	2806.3	6.2639								
250	.087 00	2662.6	2880.1	6.4085	.070 58	2644.0	2855.8	6.2872	.058 72	2623.7	2829.2	6.1749
300	.098 90	2761.6	3008.8	6.6438	.081 14	2750.1	2993.5	6.5390	.068 42	2738.0	2977.5	6.4461
350	.109 76	2851.9	3126.3	6.8403	.090 53	2843.7	3115.3	6.7428	.076 78	2835.3	3104.0	6.6579
400	.120 10	2939.1	3239.3	7.0148	.099 36	2932.8	3230.9	6.9212	.084 53	2926.4	3222.3	6.8405
450	.130 14	3025.5	3350.8	7.1746	.107 87	3020.4	3344.0	7.0834	.091 96	3015.3	3337.2	7.0052
500	.139 98	3112.1	3462.1	7.3234	.116 19	3108.0	3456.5	7.2338	.099 18	3103.0	3450.9	7.1572
600	.159 30	3288.0	3686.3	7.5960	.132 43	3285.0	3682.3	7.5085	.113 24	3282.1	3678.4	7.4339
700	.178 32	3468.7	3914.5	7.8435	.148 38	3466.5	3911.7	7.7571	.126 99	3464.3	3908.8	7.6837
800	.197 16	3655.3	4148.2	8.0720	.164 14	3653.5	4145.9	7.9862	.140 56	3651.8	4143.7	7.9134
900	.215 90	3847.9	4387.6	8.2853	.179 80	3846.5	4385.9	8.1999	.154 02	3845.0	4384.1	8.1276
1000	.2346	4046.7	4633.1	8.4861	.195 41	4045.4	4631.6	8.4009	.167 43	4044.1	4630.1	8.3288
1100	.2532	4251.5	4884.6	8.6762	.210 98	4250.3	4883.3	8.5912	.180 80	4244.9	4881.9	8.5192
1200	.2718	4462.1	5141.7	8.8569	.226 52	4460.9	5140.5	8.7720	.194 15	4459.8	5139.3	8.7000
1300	.2905	4677.8	5404.0	9.0291	.242 06	4676.6	5402.8	8.9442	.207 49	4675.5	5401.7	8.8723

	$P = 4.0 \text{ MPa (250.40)}$					$P = 4.5 \text{ MPa (257.49)}$					$P = 5.0 \text{ MPa (263.99)}$				
	T	v	u	h	s	T	v	u	h	s	T	v	u	h	s
Sat.	.049 78	2602.3	2801.4	6.0701	.011 06	2600.1	2798.3	6.0198	.039 44	2597.1	2794.3	5.9734			
275	.051 57	2667.9	2886.2	6.2285	.047 30	2650.3	2863.2	6.1401	.041 41	2631.3	2838.3	6.0544			
300	.058 84	2725.3	2960.7	6.3615	.051 35	2712.0	2943.1	6.2828	.045 32	2698.0	2924.5	6.2084			
350	.066 45	2826.7	3092.5	6.5821	.058 40	2817.8	3080.6	6.5131	.051 94	2808.7	3068.4	6.4493			
400	.073 41	2919.9	3213.6	6.7690	.064 75	2913.3	3204.7	6.7047	.057 81	2906.6	3195.7	6.6459			
450	.080 02	3010.2	3330.3	6.9363	.070 74	3005.0	3323.3	6.8746	.063 30	2999.7	3316.2	6.8186			
500	.086 43	3099.5	3445.3	7.0901	.076 51	3095.3	3439.6	7.0301	.068 57	3091.0	3433.8	6.9759			
600	.098 85	3279.1	3674.4	7.3688	.087 65	3276.0	3670.5	7.3110	.078 69	3273.0	3666.5	7.2589			
700	.110 95	3462.1	3905.9	7.6198	.098 47	3459.9	3903.0	7.5631	.088 49	3457.6	3900.1	7.5122			
800	.122 87	3650.0	4141.5	7.8502	.109 11	3648.0	4139.3	7.7942	.098 11	3646.6	4137.1	7.7440			
900	.134 69	3843.6	4382.3	8.0647	.119 65	3842.2	4380.6	8.0091	.107 62	3843.8	4378.8	7.9593			
1000	.146 45	4042.9	4628.7	8.2662	.130 13	4041.6	4627.2	8.2108	.117 07	4040.4	4625.7	8.1612			
1100	.158 17	4248.0	4880.6	8.4567	.140 56	4246.8	4879.3	8.4015	.126 48	4245.6	4878.0	8.3520			
1200	.169 87	4458.6	5138.1	8.6376	.150 98	4457.5	5136.9	8.5825	.135 87	4456.3	5135.7	8.5331			
1300	.181 56	4674.3	5400.5	8.8100	.161 39	4673.1	5399.4	8.7549	.145 26	4672.0	5398.2	8.7055			
	$P = 6.0 \text{ MPa (275.64)}$					$P = 7.0 \text{ MPa (285.88)}$					$P = 8.0 \text{ MPa (295.06)}$				
Sat.	.032 44	2589.7	2784.3	5.8892	.027 37	2580.5	2772.1	5.8133	.023 52	2569.8	2758.0	5.7432			
300	.036 16	2667.2	2884.2	6.0674	.029 47	2632.2	2838.4	5.9305	.024 26	2590.9	2785.0	5.7906			
350	.042 23	2789.6	3043.0	6.3335	.035 24	2769.4	3016.0	6.2283	.029 95	2747.7	2987.3	6.1301			
400	.047 39	2892.9	3177.2	6.5408	.039 93	2878.6	3158.1	6.4478	.034 32	2863.8	3138.3	6.3634			
450	.052 14	2988.9	3301.8	6.7193	.044 16	2978.0	3287.1	6.6327	.038 17	2966.7	3272.0	6.5551			
500	.056 65	3082.2	3422.2	6.8803	.048 14	3073.4	3410.3	6.7975	.041 75	3064.3	3398.3	6.7240			
550	.061 01	3174.6	3540.6	7.0288	.051 95	3167.2	3530.9	6.9486	.045 16	3159.8	3521.0	6.8778			
600	.065 25	3266.9	3658.4	7.1677	.055 65	3260.7	3650.3	7.0894	.048 45	3254.4	3642.0	7.0206			
700	.073 52	3453.1	3894.2	7.4234	.062 83	3448.5	3888.3	7.3476	.054 81	3443.9	3882.4	7.2812			
800	.081 60	3643.1	4132.7	7.6566	.069 81	3639.5	4128.2	7.5822	.060 97	3636.0	4123.8	7.5173			
900	.089 58	3837.8	4375.3	7.8727	.076 69	3835.0	4371.8	7.7991	.067 02	3832.1	4368.3	7.7351			
1000	.097 49	4037.8	4622.7	8.0751	.083 50	4035.3	4619.8	8.0020	.073 01	4032.8	4616.9	7.9384			
1100	.105 36	4243.3	4875.4	8.2661	.090 27	4240.9	4872.8	8.1933	.078 96	4238.6	4870.3	8.1300			

Table A.1.3 (Continued)
Superheated Vapor

T	v	u	h	s	v	u	h	s	v	u	h	s		
$P = 6.0 \text{ MPa (275.64)}$					$P = 7.0 \text{ MPa (285.88)}$					$P = 8.0 \text{ MPa (295.06)}$				
1200	.113 21	4454.0	5133.3	8.4474	.097 03	4451.7	5130.9	8.3747	.084 89	4449.5	5128.5	8.3115		
1300	.121 06	4669.6	5396.0	8.6199	.103 77	4667.3	5393.7	8.5473	.090 80	4665.0	5391.5	8.4842		
$P = 9.0 \text{ MPa (303.40)}$					$P = 10.0 \text{ MPa (311.06)}$					$P = 12.5 \text{ MPa (327.89)}$				
Sat.	.020 48	2557.8	2742.1	5.6772	.018 026	2544.4	2724.7	5.6141	.013 495	2505.1	2673.8	5.4624		
325	.023 27	2646.6	2856.0	5.8712	.019 861	2610.4	2809.1	5.7568						
350	.025 80	2724.4	2956.6	6.0361	.022 42	2699.2	2923.4	5.9443	.016 126	2624.6	2826.2	5.7118		
400	.029 93	2848.4	3117.8	6.2854	.026 41	2832.4	3096.5	6.2120	.020 00	2789.3	3039.3	6.0417		
450	.033 50	2955.2	3256.6	6.4844	.029 75	2943.4	3240.9	6.4190	.022 99	2912.5	3199.8	6.2719		
500	.036 77	3055.2	3386.1	6.6576	.032 79	3045.8	3373.7	6.5966	.025 60	3021.7	3341.8	6.4618		
550	.039 87	3152.2	3511.0	6.8142	.035 64	3144.6	3500.9	6.7561	.028 01	3125.0	3475.2	6.6290		
600	.042 85	3248.1	3633.7	6.9589	.038 37	3241.7	3625.3	6.9029	.030 29	3225.4	3604.0	6.7810		
650	.045 74	3343.6	3755.3	7.0943	.041 01	3338.2	3748.2	7.0398	.032 48	3324.4	3730.4	6.9218		
700	.048 57	3439.3	3876.5	7.2221	.043 58	3434.7	3870.5	7.1687	.034 60	3422.9	3855.3	7.0536		
800	.054 09	3632.5	4119.3	7.4596	.048 59	3628.9	4114.8	7.4077	.038 69	3620.0	4103.6	7.2965		
900	.059 50	3829.2	4364.8	7.6783	.053 49	3826.3	4361.2	7.6272	.042 67	3819.1	4352.5	7.5182		
1000	.064 85	4030.3	4614.0	7.8821	.058 32	4027.8	4611.0	7.8315	.046 58	4021.6	4603.8	7.7237		
1100	.070 16	4236.3	4867.7	8.0740	.063 12	4234.0	4865.1	8.0237	.050 45	4228.2	4858.8	7.9165		
1200	.075 44	4447.2	5126.2	8.2556	.067 89	4444.9	5123.8	8.2055	.054 30	4439.3	5118.0	8.0987		
1300	.080 72	4662.7	5389.2	8.4284	.072 65	4460.5	5387.0	8.3783	.058 13	4654.8	5381.4	8.2717		

	$P = 15.0 \text{ MPa (342.24)}$				$P = 17.5 \text{ MPa (354.75)}$				$P = 20.0 \text{ MPa (365.81)}$			
Sat.	.010 337	2455.5	2610.5	5.3098	.007 920	2390.2	2528.8	5.1419	.005 834	2293.0	2409.7	4.9269
350	.011 170	2520.4	2692.4	5.4421								
400	.015 649	2740.7	2975.5	5.8811	.012 447	2685.0	2902.9	5.7213	.009 942	2619.3	2818.1	5.5540
450	.018 445	2879.5	3156.2	6.1404	.015 174	2844.2	3109.7	6.0184	.012 695	2806.2	3060.1	5.9017
500	.020 80	2996.6	3308.6	6.3443	.017 358	2970.3	3274.1	6.2383	.014 768	2942.9	3238.2	6.1401
550	.022 93	3104.7	3448.6	6.5199	.019 288	3083.9	3421.4	6.4230	.016 555	3062.4	3393.5	6.3348
600	.024 91	3208.6	3582.3	6.6776	.021 06	3191.5	3560.1	6.5866	.018 178	3174.0	3537.6	6.5048
650	.026 80	3310.3	3712.3	6.8224	.022 74	3296.0	3693.9	6.7357	.019 693	3281.4	3675.3	6.6582
700	.028 61	3410.9	3840.1	6.9572	.024 34	3398.7	3824.6	6.8736	.021 13	3386.4	3809.0	6.7993
800	.032 10	3610.9	4092.4	7.2040	.027 38	3601.8	4081.1	7.1244	.023 85	3592.7	4069.7	7.0544
900	.035 46	3811.9	4343.8	7.4279	.030 31	3804.7	4335.1	7.3507	.026 45	3797.5	4326.4	7.2830
1000	.038 75	4015.4	4596.6	7.6348	.033 16	4009.3	4589.5	7.5589	.028 97	4003.1	4582.5	7.4925
1100	.042 00	4222.6	4852.6	7.8283	.035 97	4216.9	4846.4	7.7531	.031 45	4211.3	4840.2	7.6874
1200	.045 23	4433.8	5112.3	8.0108	.038 76	4428.3	5106.6	7.9360	.033 91	4422.8	5101.0	7.8707
1300	.048 45	4649.1	5376.0	8.1840	.041 54	4643.5	5370.5	8.1093	.036 36	4638.0	5365.1	8.0442
	$P = 25.0 \text{ MPa}$				$P = 30.0 \text{ MPa}$				$P = 35.0 \text{ MPa}$			
375	.001 973 1	1798.7	1848.0	4.0320	.001 789 2	1737.8	1791.5	3.9305	.001 700 3	1702.9	1762.4	3.8722
400	.006 004	2430.1	2580.2	5.1418	.002 790	2067.4	2151.1	4.4728	.002 100	1914.1	1987.6	4.2126
425	.007 881	2609.2	2806.3	5.4723	.005 303	2455.1	2614.2	5.1504	.003 428	2253.4	2373.4	4.7747
450	.009 162	2720.7	2949.7	5.6744	.006 735	2619.3	2821.4	5.4424	.004 961	2498.7	2672.4	5.1962
500	.011 123	2884.3	3162.4	5.9592	.008 678	2820.7	3081.1	5.7905	.006 927	2751.9	2994.4	5.6282
550	.012 724	3017.5	3335.6	6.1765	.010 168	2970.3	3275.4	6.0342	.008 345	2921.0	3213.0	5.9026
600	.014 137	3137.9	3491.4	6.3602	.011 446	3100.5	3443.9	6.2331	.009 527	3062.0	3395.5	6.1179
650	.015 433	3251.6	3637.4	6.5229	.012 596	3221.0	3598.9	6.4058	.010 575	3189.8	3559.9	6.3010
700	.016 616	3361.3	3777.5	6.6707	.013 661	3335.8	3745.6	6.5606	.011 533	3309.8	3713.5	6.4631
800	.018 942	3574.3	4047.1	6.9345	.015 623	3555.5	4024.2	6.8332	.013 278	3536.7	4001.5	6.7450
900	.021 045	3783.0	4309.1	7.1680	.017 448	3768.5	4291.9	7.0718	.014 883	3754.0	4274.9	6.9886
1000	.023 10	3990.9	4568.5	7.3802	.019 196	3978.8	4554.7	7.2867	.016 410	3966.7	4541.1	7.2064
1100	.025 12	4200.2	4828.2	7.5765	.020 903	4189.2	4816.3	7.4845	.017 895	4178.3	4804.6	7.4057

Table A.1.3 (Continued)
Superheated Vapor

T	v	u	h	s	v	u	h	s	v	u	h	s
$P = 25.0 \text{ MPa}$				$P = 30.0 \text{ MPa}$				$P = 35.0 \text{ MPa}$				
1200	.027 11	4412.0	5089.9	7.7605	.022 589	4401.3	5079.0	7.6692	.019 360	4390.7	5038.3	7.5910
1300	.029 10	4626.9	5354.4	7.9342	.024 266	4616.0	5344.0	7.8432	.020 815	4605.1	5333.6	7.7653
$P = 40.0 \text{ MPa}$				$P = 50.0 \text{ MPa}$				$P = 60.0 \text{ MPa}$				
375	.001 640 7	1677.1	1742.8	3.8290	.001 559 4	1638.6	1716.6	3.7639	.001 502 8	1609.4	1699.5	3.7141
400	.001 907 7	1854.6	1930.9	4.1135	.001 730 9	1788.1	1874.6	4.0031	.001 633 5	1745.4	1843.4	3.9318
425	.002 532	2096.9	2198.1	4.5029	.002 007	1959.7	2060.0	4.2734	.001 816 5	1892.7	2001.7	4.1626
450	.003 693	2365.1	2512.8	4.9459	.002 486	2159.6	2284.0	4.5884	.002 085	2053.9	2179.0	4.4121
500	.005 622	2678.4	2903.3	5.4700	.003 892	2525.5	2720.1	5.1726	.002 956	2390.6	2567.9	4.9321
550	.006 984	2869.7	3149.1	5.7785	.005 118	2763.6	3019.5	5.5485	.003 956	2658.8	2896.2	5.3441
600	.008 094	3022.6	3346.4	6.0114	.006 112	2942.0	3247.6	5.8178	.004 834	2861.1	3151.2	5.6452
650	.009 063	3158.0	3520.6	6.2054	.006 966	3093.5	3441.8	6.0342	.005 595	3028.8	3364.5	5.8829
700	.009 941	3283.6	3681.2	6.3750	.007 727	3230.5	3616.8	6.2189	.006 272	3177.2	3553.5	6.0824
800	.011 523	3517.8	3978.7	6.6662	.009 076	3479.8	3933.6	6.5290	.007 459	3441.5	3889.1	6.4109
900	.012 862	3739.4	4257.9	6.9150	.010 283	3710.3	4224.4	6.7882	.008 508	3681.0	4191.5	6.6805
1000	.014 324	3954.6	4527.6	7.1356	.011 411	3930.5	4501.1	7.0146	.009 480	3906.4	4475.2	6.9127
1100	.015 642	4167.4	4793.1	7.3364	.012 496	4145.7	4770.5	7.2184	.010 409	4124.1	4748.6	7.1195
1200	.016 940	4380.1	5057.7	7.5224	.013 561	4359.1	5037.2	7.4058	.011 317	4338.2	5017.2	7.3083
1300	.018 229	4594.3	5323.5	7.6969	.014 616	4572.8	5303.6	7.5808	.012 215	4551.4	5284.3	7.4837

Table A.1.4
Compressed Liquid

<i>T</i>	<i>P</i> = 5 MPa (263.99)				<i>P</i> = 10 MPa (311.06)				<i>P</i> = 15 MPa (342.24)			
	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
Sat.	.001 285 9	1147.8	1154.2	2.9202	.001 452 4	1393.0	1407.6	3.3596	.001 658 1	1585.6	1610.5	3.6848
0	.000 997 7	.04	5.04	.0001	.000 995 2	.09	10.04	.0002	.000 992 8	.15	15.05	.0004
20	.000 999 5	83.65	88.65	.2956	.000 997 2	83.36	93.33	.2945	.000 995 0	83.06	97.99	.2934
40	.001 005 6	166.95	171.97	.5705	.001 003 4	166.35	176.38	.5686	.001 001 3	165.76	180.78	.5666
60	.001 014 9	250.23	255.30	.8285	.001 012 7	249.36	259.49	.8258	.001 010 5	248.51	263.67	.8232
80	.001 026 8	333.72	338.85	1.0720	.001 024 5	332.59	342.83	1.0688	.001 022 2	331.48	346.81	1.0656
100	.001 041 0	417.52	422.72	1.3030	.001 038 5	416.12	426.50	1.2992	.001 036 1	414.74	430.28	1.2955
120	.001 057 6	501.80	507.09	1.5233	.001 054 9	500.08	510.64	1.5189	.001 052 2	498.40	514.19	1.5145
140	.001 076 8	586.76	592.15	1.7343	.001 073 7	584.68	595.42	1.7292	.001 070 7	582.66	598.72	1.7242
160	.001 098 8	672.62	678.12	1.9375	.001 095 3	670.13	681.08	1.9317	.001 091 8	667.71	684.09	1.9260
180	.001 124 0	759.63	765.25	2.1341	.001 119 9	756.65	767.84	2.1275	.001 115 9	753.76	770.50	2.1210
200	.001 153 0	848.1	853.9	2.3255	.001 148 0	844.5	856.0	2.3178	.001 143 3	841.0	858.2	2.3104
220	.001 186 6	938.4	944.4	2.5128	.001 180 5	934.1	945.9	2.5039	.001 174 8	929.9	947.5	2.4953
240	.001 226 4	1031.4	1037.5	2.6979	.001 218 7	1026.0	1038.1	2.6872	.001 211 4	1020.8	1039.0	2.6771
260	.001 274 9	1127.9	1134.3	2.8830	.001 264 5	1121.1	1133.7	2.8699	.001 255 0	1114.6	1133.4	2.8576
280					.001 321 6	1220.9	1234.1	3.0548	.001 308 4	1212.5	1232.1	3.0393
300					.001 397 2	1328.4	1342.3	3.2469	.001 377 0	1316.6	1337.3	3.2260
320									.001 472 4	1431.1	1453.2	3.4247
340									.001 631 1	1567.5	1591.9	3.6546

Table A.1.4 (Continued)
Compressed Liquid

<i>T</i>	<i>P</i> = 20 MPa (365.81)				<i>P</i> = 30 MPa				<i>P</i> = 50 MPa			
	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
Sat.	.002 036	1785.6	1826.3	4.0139								
0	.000 990 4	.19	20.01	.0004	.000 985 6	.25	29.82	.0001	.000 976 6	.20	49.03	.0014
20	.000 992 8	82.77	102.62	.2923	.000 988 6	82.17	111.84	.2899	.000 980 4	81.00	130.02	.2848
40	.000 999 2	165.17	185.16	.5646	.000 995 1	164.04	193.89	.5607	.000 987 2	161.86	211.21	.5527
60	.001 008 4	247.68	267.85	.8206	.001 004 2	246.06	276.19	.8154	.000 996 2	242.98	292.79	.8052
80	.001 019 9	330.40	350.80	1.0624	.001 015 6	328.30	358.77	1.0561	.001 007 3	324.34	374.70	1.0440
100	.001 033 7	413.39	434.06	1.2917	.001 029 0	410.78	441.66	1.2844	.001 020 1	405.88	456.89	1.2703
120	.001 049 6	496.76	517.76	1.5102	.001 044 5	493.59	524.93	1.5018	.001 034 8	487.65	539.39	1.4857
140	.001 067 8	580.69	602.04	1.7193	.001 062 1	576.88	608.75	1.7098	.001 051 5	569.77	622.35	1.6915
160	.001 088 5	665.35	687.12	1.9204	.001 082 1	660.82	693.28	1.9096	.001 070 3	652.41	705.92	1.8891
180	.001 112 0	750.95	773.20	2.1147	.001 104 7	745.59	778.73	2.1024	.001 091 2	735.69	790.25	2.0794
200	.001 138 8	837.7	860.5	2.3031	.001 130 2	831.4	865.3	2.2893	.001 114 6	819.7	875.5	2.2634
220	.001 169 3	925.9	949.3	2.4870	.001 159 0	918.3	953.1	2.4711	.001 140 8	904.7	961.7	2.4419
240	.001 204 6	1016.0	1040.0	2.6674	.001 192 0	1006.9	1042.6	2.6490	.001 170 2	990.7	1049.2	2.6158
260	.001 246 2	1108.6	1133.5	2.8459	.001 230 3	1097.4	1134.3	2.8243	.001 203 4	1078.1	1138.2	2.7860
280	.001 296 5	1204.7	1230.6	3.0248	.001 275 5	1190.7	1229.0	2.9986	.001 241 5	1167.2	1229.3	2.9537
300	.001 359 6	1306.1	1333.3	3.2071	.001 330 4	1287.9	1327.8	3.1741	.001 286 0	1258.7	1323.0	3.1200
320	.001 443 7	1415.7	1444.6	3.3979	.001 399 7	1390.7	1432.7	3.3539	.001 338 8	1353.3	1420.2	3.2868
340	.001 568 4	1539.7	1571.0	3.6075	.001 492 0	1501.7	1546.5	3.5426	.001 403 2	1452.0	1522.1	3.4557
360	.001 822 6	1702.8	1739.3	3.8772	.001 626 5	1626.6	1675.4	3.7494	.001 483 8	1556.0	1630.2	3.6291
380					.001 869 1	1781.4	1837.5	4.0012	.001 588 4	1667.2	1746.6	3.8101

Table A.1.5
Saturated Solid-Vapor

Temp. °C T	Specific Volume			Internal Energy			Enthalpy			Entropy		
	Press. kPa P	Sat. Solid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor v_g	Sat. Solid u_f	Subl. u_w	Sat. Vapor u_g	Sat. Solid h_f	Subl. h_w	Sat. Vapor h_g	Sat. Solid s_f	Subl. s_w	Sat. Vapor s_g
.01	.6113	1.0908	206.1	-333.40	2708.7	2375.3	-333.40	2834.8	2501.4	-1.221	10.378	9.156
0	.6108	1.0908	206.3	-333.43	2708.8	2375.3	-333.43	2834.8	2501.3	-1.221	10.378	9.157
-2	.5176	1.0904	241.7	-337.62	2710.2	2372.6	-337.62	2835.3	2497.7	-1.237	10.456	9.219
-4	.4375	1.0901	283.8	-341.78	2711.6	2369.8	-341.78	2835.7	2494.0	-1.253	10.536	9.283
-6	.3689	1.0898	334.2	-345.91	2712.9	2367.0	-345.91	2836.2	2490.3	-1.268	10.616	9.348
-8	.3102	1.0894	394.4	-350.02	2714.2	2364.2	-350.02	2836.6	2486.6	-1.284	10.698	9.414
-10	.2602	1.0891	466.7	-354.09	2715.5	2361.4	-354.09	2837.0	2482.9	-1.299	10.781	9.481
-12	.2176	1.0888	553.7	-358.14	2716.8	2358.7	-358.14	2837.3	2479.2	-1.315	10.865	9.550
-14	.1815	1.0884	658.8	-362.15	2718.0	2355.9	-362.15	2837.6	2475.5	-1.331	10.950	9.619
-16	.1510	1.0881	786.0	-366.14	2719.2	2353.1	-366.14	2837.9	2471.8	-1.346	11.036	9.690
-18	.1252	1.0878	940.5	-370.10	2720.4	2350.3	-370.10	2838.2	2468.1	-1.362	11.123	9.762
-20	.1035	1.0874	1128.6	-374.03	2721.6	2347.5	-374.03	2838.4	2464.3	-1.377	11.212	9.835
-22	.0853	1.0871	1358.4	-377.93	2722.7	2344.7	-377.93	2838.6	2460.6	-1.393	11.302	9.909
-24	.0701	1.0868	1640.1	-381.80	2723.7	2342.0	-381.80	2838.7	2456.9	-1.408	11.394	9.985
-26	.0574	1.0864	1986.4	-385.64	2724.8	2339.2	-385.64	2838.9	2453.2	-1.424	11.486	10.062
-28	.0469	1.0861	2413.7	-389.45	2725.8	2336.4	-389.45	2839.0	2449.5	-1.439	11.580	10.141
-30	.0381	1.0858	2943.	-393.23	2726.8	2333.6	-393.23	2839.0	2445.8	-1.455	11.676	10.221
-32	.0309	1.0854	3600	-396.98	2727.8	2330.8	-396.98	2839.1	2442.1	-1.471	11.773	10.303
-34	.0250	1.0851	4419	-400.71	2728.7	2328.0	-400.71	2839.1	2438.4	-1.486	11.872	10.386
-36	.0201	1.0848	5444	-404.40	2729.6	2325.2	-404.40	2839.1	2434.7	-1.501	11.972	10.470
-38	.0161	1.0844	6731	-408.06	2730.5	2322.4	-408.06	2839.0	2430.9	-1.517	12.073	10.556
-40	.0129	1.0841	8354	-411.70	2731.3	2319.6	-411.70	2838.9	2427.2	-1.532	12.176	10.644

Table A.2
Thermodynamic Properties of Ammonia^a
Table A.2.1
Saturated Ammonia

Temp. °C	Abs. Press. kPa P	Specific Volume m ³ /kg			Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg K		
		Sat. Liquid v_f	Evap. v_{fg}	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g	Sat. Liquid s_f	Evap. s_{fg}	Sat. Vapor s_g
-50	40.88	0.001 424	2.6239	2.6254	-44.3	1416.7	1372.4	-0.1942	6.3502	6.1561
-48	45.96	0.001 429	2.3518	2.3533	-35.5	1411.3	1375.8	-0.1547	6.2696	6.1149
-46	51.55	0.001 434	2.1126	2.1140	-26.6	1405.8	1379.2	-0.1156	6.1902	6.0746
-44	57.69	0.001 439	1.9018	1.9032	-17.8	1400.3	1382.5	-0.0768	6.1120	6.0352
-42	64.42	0.001 444	1.7155	1.7170	-8.9	1394.7	1385.8	-0.0382	6.0349	5.9967
-40	71.77	0.001 449	1.5506	1.5521	0.0	1389.0	1389.0	0.0000	5.9589	5.9589
-38	79.80	0.001 454	1.4043	1.4058	8.9	1383.3	1392.2	0.0380	5.8840	5.9220
-36	88.54	0.001 460	1.2742	1.2757	17.8	1377.6	1395.4	0.0757	5.8101	5.8858
-34	98.05	0.001 465	1.1582	1.1597	26.8	1371.8	1398.5	0.1132	5.7372	5.8504
-32	108.37	0.001 470	1.0547	1.0562	35.7	1365.9	1401.6	0.1504	5.6652	5.8156
-30	119.55	0.001 476	0.9621	0.9635	44.7	1360.0	1404.6	0.1873	5.5942	5.7815
-28	131.64	0.001 481	0.8790	0.8805	53.6	1354.0	1407.6	0.2240	5.5241	5.7481
-26	144.70	0.001 487	0.8044	0.8059	62.6	1347.9	1410.5	0.2605	5.4548	5.7153
-24	158.78	0.001 492	0.7373	0.7388	71.6	1341.8	1413.4	0.2967	5.3864	5.6831
-22	173.93	0.001 498	0.6768	0.6783	80.7	1335.6	1416.2	0.3327	5.3188	5.6515
-20	190.22	0.001 504	0.6222	0.6237	89.7	1329.3	1419.0	0.3684	5.2520	5.6205
-18	207.71	0.001 510	0.5728	0.5743	98.8	1322.9	1421.7	0.4040	5.1860	5.5900
-16	226.45	0.001 515	0.5280	0.5296	107.8	1316.5	1424.4	0.4393	5.1207	5.5600
-14	246.51	0.001 521	0.4874	0.4889	116.9	1310.0	1427.0	0.4744	5.0561	5.5305
-12	267.95	0.001 528	0.4505	0.4520	126.0	1303.5	1429.5	0.5093	4.9922	5.5015

-10	290.85	0.001 534	0.4169	0.1185	135.2	1296.8	1432.0	0.5440	4.9290	5.4730
-8	315.25	0.001 540	0.3463	0.3978	144.3	1290.1	1434.4	0.5785	4.8664	5.4449
-6	341.25	0.001 546	0.3583	0.3599	153.5	1283.3	1436.8	0.6128	4.8045	5.4173
-4	368.90	0.001 553	0.3328	0.3343	162.7	1276.4	1439.1	0.6469	4.7432	5.3901
-2	398.27	0.001 559	0.3094	0.3109	171.9	1269.4	1441.3	0.6808	4.6825	5.3633
0	429.44	0.001 566	0.2879	0.2895	181.1	1262.4	1443.5	0.7145	4.6223	5.3369
2	462.49	0.001 573	0.2683	0.2698	190.4	1255.2	1445.6	0.7481	4.5627	5.3108
4	497.19	0.001 580	0.2502	0.2517	199.6	1248.0	1447.6	0.7815	4.5037	5.2852
6	534.51	0.001 587	0.2335	0.2351	208.9	1240.6	1449.6	0.8148	4.4451	5.2599
8	573.64	0.001 594	0.2182	0.2198	218.3	1233.2	1451.5	0.8479	4.3871	5.2350
10	614.95	0.001 601	0.2040	0.2056	227.6	1225.7	1453.3	0.8808	4.3295	5.2104
12	658.52	0.001 608	0.1910	0.1926	237.0	1218.1	1455.1	0.9136	4.2725	5.1861
14	704.44	0.001 616	0.1789	0.1805	246.4	1210.4	1456.8	0.9463	4.2159	5.1621
16	752.79	0.001 623	0.1677	0.1693	255.9	1202.6	1458.5	0.9788	4.1597	5.1385
18	803.66	0.001 631	0.1574	0.1590	265.4	1194.7	1460.0	1.0112	4.1039	5.1151
20	857.12	0.001 639	0.1477	0.1494	274.9	1186.7	1461.5	1.0434	4.0486	5.0920
22	913.27	0.001 647	0.1388	0.1405	284.4	1178.5	1462.9	1.0755	3.9937	5.0692
24	972.19	0.001 655	0.1305	0.1322	294.0	1170.3	1464.3	1.1075	3.9392	5.0467
26	1033.97	0.001 663	0.1228	0.1245	303.6	1162.0	1465.6	1.1394	3.8850	5.0244
28	1098.71	0.001 671	0.1156	0.1173	313.2	1153.6	1466.8	1.1711	3.8312	5.0023
30	1166.49	0.001 680	0.1089	0.1106	322.9	1145.0	1467.9	1.2028	3.7777	4.9805
32	1237.41	0.001 689	0.1027	0.1044	332.6	1136.4	1469.0	1.2343	3.7246	4.9589
34	1311.55	0.001 698	0.0969	0.0986	342.3	1127.6	1469.9	1.2656	3.6718	4.9374
36	1389.03	0.001 707	0.0914	0.0931	352.1	1118.7	1470.8	1.2969	3.6192	4.9161
38	1469.92	0.001 716	0.0863	0.0880	361.9	1109.7	1471.5	1.3281	3.5669	4.8950
40	1554.33	0.001 726	0.0815	0.0833	371.7	1100.5	1472.2	1.3591	3.5148	4.8740
42	1642.35	0.001 735	0.0771	0.0788	381.6	1091.2	1472.8	1.3901	3.4630	4.8530
44	1734.09	0.001 745	0.0728	0.0746	391.5	1081.7	1473.2	1.4209	3.4112	4.8322
46	1829.65	0.001 756	0.0689	0.0707	401.5	1072.0	1473.5	1.4518	3.3595	4.8113
48	1929.13	0.001 766	0.0652	0.0669	411.5	1062.2	1473.7	1.4826	3.3079	4.7905
50	2032.62	0.001 777	0.0617	0.0635	421.7	1052.0	1473.7	1.5135	3.2561	4.7696

*Adapted from National Bureau of Standards Circular No. 142, *Tables of Thermodynamic Properties of Ammonia*.

Table A.2.2
Superheated Ammonia

Abs. Press. kPa (Sat. Temp.) °C	Temperature, °C											
	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	100
<i>v</i>	2.4474	2.5481	2.6482	2.7479	2.8473	2.9464	3.0453	3.1441	3.2427	3.3413	3.4397	
50 (-46.54)	<i>h</i>	1435.8	1457.0	1478.1	1499.2	1520.4	1541.7	1563.0	1584.5	1606.1	1627.8	1649.7
	<i>s</i>	6.3256	6.4077	6.4865	6.5625	6.6360	6.7073	6.7766	6.8441	6.9099	6.9743	7.0372
	<i>v</i>	1.6233	1.6915	1.7591	1.8263	1.8932	1.9597	2.0261	2.0923	2.1584	2.2244	2.2903
75 (-39.18)	<i>h</i>	1433.0	1454.7	1476.1	1497.5	1518.9	1540.3	1561.8	1583.4	1605.1	1626.9	1648.9
	<i>s</i>	6.1190	6.2028	6.2828	6.3597	6.4339	6.5058	6.5756	6.6434	6.7096	6.7742	6.8373
	<i>v</i>	1.2110	1.2631	1.3145	1.3654	1.4160	1.4664	1.5165	1.5664	1.6163	1.6659	1.7155
100 (-33.61)	<i>h</i>	1430.1	1452.2	1474.1	1495.7	1517.3	1538.9	1560.5	1582.2	1604.1	1626.0	1648.0
	<i>s</i>	5.9695	6.0552	6.1366	6.2144	6.2894	6.3618	6.4321	6.5003	6.5668	6.6316	6.6950
	<i>v</i>	0.9635	1.0059	1.0476	1.0889	1.1297	1.1703	1.2107	1.2509	1.2909	1.3309	1.3707
125 (-29.08)	<i>h</i>	1427.2	1449.8	1472.0	1493.9	1515.7	1537.5	1559.3	1581.1	1603.0	1625.0	1647.2
	<i>s</i>	5.8512	5.9389	6.0217	6.1006	6.1763	6.2494	6.3201	6.3887	6.4555	6.5206	6.5842
	<i>v</i>	0.7984	0.8344	0.8697	0.9045	0.9388	0.9729	1.0068	1.0405	1.0740	1.1074	1.1408
150 (-25.23)	<i>h</i>	1424.1	1447.3	1469.8	1492.1	1514.1	1536.1	1558.0	1580.0	1602.0	1624.1	1646.3
	<i>s</i>	5.7526	5.8424	5.9266	6.0066	6.0831	6.1568	6.2280	6.2970	6.3641	6.4295	6.4933
	<i>v</i>	0.6199	0.6471	0.6738	0.7001	0.7261	0.7519	0.7774	0.8029	0.8282	0.8533	0.9035
200 (-18.86)	<i>h</i>	1442.0	1465.5	1488.4	1510.9	1533.2	1555.5	1577.7	1599.9	1622.2	1644.6	1689.6
	<i>s</i>	5.6863	5.7737	5.8559	5.9342	6.0091	6.0813	6.1512	6.2189	6.2849	6.3491	6.4732
	<i>v</i>	0.4910	0.5135	0.5354	0.5568	0.5780	0.5989	0.6196	0.6401	0.6605	0.6809	0.7212
250 (-13.67)	<i>h</i>	1436.6	1461.0	1484.5	1507.6	1530.3	1552.9	1575.4	1597.8	1620.3	1642.8	1688.2
	<i>s</i>	5.5609	5.6517	5.7365	5.8165	5.8928	5.9661	6.0368	6.1052	6.1717	6.2365	6.3613
	<i>v</i>		0.4243	0.4430	0.4613	0.4792	0.4968	0.5143	0.5316	0.5488	0.5658	0.5997
300 (-9.23)	<i>h</i>		1156.3	1480.6	1504.2	1527.4	1550.3	1573.0	1595.7	1618.4	1641.1	1686.7
	<i>s</i>		5.5493	5.6366	5.7186	5.7963	5.8707	5.9423	6.0114	6.0785	6.1437	6.2693
	<i>v</i>		0.3605	0.3770	0.3929	0.4086	0.4239	0.4391	0.4541	0.4689	0.4837	0.5129

350	<i>h</i>		1451.5	1476.5	1500.7	1524.4	1547.6	1570.7	1593.6	1616.5	1639.3	1685.2
(-5.35)	<i>s</i>		5.0600	5.5502	5.6342	5.7135	5.7890	5.8615	5.9314	5.9990	6.0647	6.1910
	<i>v</i>		0.3125	0.3274	0.3417	0.3556	0.3692	0.3826	0.3959	0.4090	0.4220	0.4478
400	<i>h</i>		1446.5	1472.4	1497.2	1521.3	1544.9	1568.3	1591.5	1614.5	1637.6	1683.7
(-1.89)	<i>s</i>		5.3803	5.4735	5.5597	5.6405	5.7173	5.7907	5.8613	5.9296	5.9957	6.1228
	<i>v</i>		0.2752	0.2887	0.3017	0.3143	0.3266	0.3387	0.3506	0.3624	0.3740	0.3971
450	<i>h</i>		1441.3	1468.1	1493.6	1518.2	1542.2	1565.9	1589.3	1612.6	1635.8	1682.2
(1.26)	<i>s</i>		5.3078	5.4042	5.4926	5.5752	5.6532	5.7275	5.7989	5.8678	5.9345	6.0623

		20	30	40	50	60	70	80	100	120	140	160	180
	<i>v</i>	0.2698	0.2813	0.2926	0.3036	0.3144	0.3251	0.3357	0.3565	0.3771	0.3975		
500	<i>h</i>	1489.9	1515.0	1539.5	1563.4	1587.1	1610.6	1634.0	1680.7	1727.5	1774.7		
(4.14)	<i>s</i>	5.4314	5.5157	5.5950	5.6704	5.7425	5.8120	5.8793	6.0079	6.1301	6.2472		
	<i>v</i>	0.2217	0.2317	0.2414	0.2508	0.2600	0.2691	0.2781	0.2957	0.3130	0.3302		
600	<i>h</i>	1482.4	1508.6	1533.8	1558.5	1582.7	1606.6	1630.4	1677.7	1724.9	1772.4		
(9.29)	<i>s</i>	5.3222	5.4102	5.4923	5.5697	5.6436	5.7144	5.7826	5.9129	6.0363	6.1541		
	<i>v</i>	0.1874	0.1963	0.2048	0.2131	0.2212	0.2291	0.2369	0.2522	0.2672	0.2821		
700	<i>h</i>	1474.5	1501.9	1528.1	1553.4	1578.2	1602.6	1626.8	1674.6	1722.4	1770.2		
(13.81)	<i>s</i>	5.2259	5.3179	5.4029	5.4826	5.5582	5.6303	5.6997	5.8316	5.9562	6.0749		
	<i>v</i>	0.1615	0.1696	0.1773	0.1848	0.1920	0.1991	0.2060	0.2196	0.2329	0.2459	0.2589	
800	<i>h</i>	1466.3	1495.0	1522.2	1548.3	1573.7	1598.6	1623.1	1671.6	1719.8	1768.0	1816.4	
(17.86)	<i>s</i>	5.1387	5.2351	5.3232	5.4053	5.4827	5.5562	5.6268	5.7603	5.8861	6.0057	6.1202	
	<i>v</i>		0.1488	0.1559	0.1627	0.1693	0.1757	0.1820	0.1942	0.2061	0.2178	0.2294	
900	<i>h</i>		1488.0	1516.2	1543.0	1569.1	1594.4	1619.4	1668.5	1717.1	1765.7	1814.4	
(21.54)	<i>s</i>		5.1593	5.2508	5.3354	5.4147	5.4897	5.5614	5.6968	5.8237	5.9442	6.0594	
	<i>v</i>		0.1321	0.1388	0.1450	0.1511	0.1570	0.1627	0.1739	0.1847	0.1954	0.2058	0.2162
1000	<i>h</i>		1480.6	1510.0	1537.7	1564.4	1590.3	1615.6	1665.4	1714.5	1763.4	1812.4	1861.7
(24.91)	<i>s</i>		5.0889	5.1840	5.2713	5.3525	5.4292	5.5021	5.6392	5.7674	5.8888	6.0047	6.1159
	<i>v</i>			0.1129	0.1185	0.1238	0.1289	0.1338	0.1434	0.1526	0.1616	0.1705	0.1792
1200	<i>h</i>			1497.1	1526.6	1554.7	1581.7	1608.0	1659.2	1709.2	1758.9	1808.5	1858.2
(30.96)	<i>s</i>			5.0629	5.1560	5.2416	5.3215	5.3970	5.5379	5.6687	5.7919	5.9091	6.0214

Table A.2.2 (Continued)
Superheated Ammonia

Abs. Press. kPa (Sat. Temp.) °C	Temperature, °C												
	20	30	40	50	60	70	80	100	120	140	160	180	
1100	<i>v</i>			0.0944	0.0995	0.1042	0.1088	0.1132	0.1216	0.1297	0.1376	0.1452	0.1528
(36.28)	<i>h</i>			1483.4	1515.1	1544.7	1573.0	1600.2	1652.8	1703.9	1754.3	1804.5	1854.7
	<i>s</i>			4.9534	5.0530	5.1434	5.2270	5.3053	5.4501	5.5836	5.7087	5.8273	5.9406
1600	<i>h</i>				0.0851	0.0895	0.0937	0.0977	0.1053	0.1125	0.1195	0.1263	0.1330
(41.05)	<i>s</i>				4.9584	5.0543	5.1419	5.2232	5.3722	5.5084	5.6355	5.7555	5.8699
	<i>v</i>				0.0739	0.0781	0.0820	0.0856	0.0926	0.0992	0.1055	0.1116	0.1177
1800	<i>h</i>				1490.0	1523.5	1554.6	1584.1	1639.8	1693.1	1745.1	1796.5	1847.7
(45.39)	<i>s</i>				4.8693	4.9715	5.0635	5.1482	5.3018	5.4409	5.5699	5.6914	5.8069
	<i>v</i>				0.0648	0.0688	0.0725	0.0760	0.0824	0.0885	0.0943	0.0999	0.1054
2000	<i>h</i>				1476.1	1512.0	1544.9	1575.6	1633.2	1687.6	1740.4	1792.4	1844.1
(49.38)	<i>s</i>				4.7834	4.8930	4.9902	5.0786	5.2371	5.3793	5.5104	5.6333	5.7499

Table A.3
Thermodynamic Properties of Freon-12 (Dichlorodifluoromethane)^a
Table A.3.1
Saturated Freon-12

Temp. °C	Abs. Press. MPa <i>P</i>	Specific Volume m ³ /kg			Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg K		
		Sat. Liquid <i>v_f</i>	Evap. <i>v_g</i>	Sat. Vapor <i>v_g</i>	Sat. Liquid <i>h_f</i>	Evap. <i>h_{fg}</i>	Sat. Vapor <i>h_g</i>	Sat. Liquid <i>s_f</i>	Evap. <i>s_{fg}</i>	Sat. Vapor <i>s_g</i>
-90	0.0028	0.000 608	4.414 937	4.415 545	-43.243	189.618	146.375	-0.2084	1.0352	0.8268
-85	0.0042	0.000 612	3.036 704	3.037 316	-38.968	187.608	148.640	-0.1854	0.9970	0.8116
-80	0.0062	0.000 617	2.137 728	2.138 345	-34.688	185.612	150.924	-0.1630	0.9609	0.7979
-75	0.0088	0.000 622	1.537 030	1.537 651	-30.401	183.625	153.224	-0.1411	0.9266	0.7855
-70	0.0123	0.000 627	1.126 654	1.127 280	-26.103	181.640	155.536	-0.1197	0.8940	0.7744
-65	0.0168	0.000 632	0.840 534	0.841 166	-21.793	179.651	157.857	-0.0987	0.8630	0.7643
-60	0.0226	0.000 637	0.637 274	0.637 910	-17.469	177.653	160.184	-0.0782	0.8334	0.7552
-55	0.0300	0.000 642	0.490 358	0.491 000	-13.129	175.641	162.512	-0.0581	0.8051	0.7470
-50	0.0391	0.000 648	0.382 457	0.383 105	-8.772	173.611	164.840	-0.0384	0.7779	0.7396
-45	0.0504	0.000 654	0.302 029	0.302 682	-4.396	171.558	167.163	-0.0190	0.7519	0.7329
-40	0.0642	0.000 659	0.241 251	0.241 910	-0.000	169.479	169.479	-0.0000	0.7269	0.7269
-35	0.0807	0.000 666	0.194 732	0.195 398	4.416	167.368	171.784	0.0187	0.7027	0.7214
-30	0.1004	0.000 672	0.158 703	0.159 375	8.854	165.222	174.076	0.0371	0.6795	0.7165
-25	0.1237	0.000 679	0.130 487	0.131 166	13.315	163.037	176.352	0.0552	0.6570	0.7121
-20	0.1509	0.000 685	0.108 162	0.108 847	17.800	160.810	178.610	0.0730	0.6352	0.7082
-15	0.1826	0.000 693	0.090 326	0.091 018	22.312	158.534	180.846	0.0906	0.6141	0.7046
-10	0.2191	0.000 700	0.075 946	0.076 646	26.851	156.207	183.058	0.1079	0.5936	0.7014
-5	0.2610	0.000 708	0.064 255	0.064 963	31.420	153.823	185.243	0.1250	0.5736	0.6986
0	0.3086	0.000 716	0.054 673	0.055 389	36.022	151.376	187.397	0.1418	0.5542	0.6960
5	0.3626	0.000 724	0.046 761	0.047 485	40.659	148.859	189.518	0.1585	0.5351	0.6937

Table A.3.1 (Continued)

Temp. °C	Abs. Press. MPa <i>P</i>	Specific Volume m ³ /kg			Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg K		
		Sat. Liquid <i>v_f</i>	Evap. <i>v_g</i>	Sat. Vapor <i>v_g</i>	Sat. Liquid <i>h_f</i>	Evap. <i>h_{fg}</i>	Sat. Vapor <i>h_g</i>	Sat. Liquid <i>s_f</i>	Evap. <i>s_{fg}</i>	Sat. Vapor <i>s_g</i>
10	0.4233	0.000 733	0.040 180	0.040 914	45.337	146.265	191.602	0.1750	0.5165	0.6916
15	0.4914	0.000 743	0.034 671	0.035 413	50.058	143.586	193.644	0.1914	0.4983	0.6897
20	0.5673	0.000 752	0.030 028	0.030 780	54.828	140.812	195.641	0.2076	0.4803	0.6879
25	0.6516	0.000 763	0.026 091	0.026 854	59.653	137.933	197.586	0.2237	0.4626	0.6863
30	0.7449	0.000 774	0.022 734	0.023 508	64.539	134.936	199.475	0.2397	0.4451	0.6848
35	0.8477	0.000 786	0.019 855	0.020 641	69.494	131.805	201.299	0.2557	0.4277	0.6834
40	0.9607	0.000 798	0.017 373	0.018 171	74.527	128.525	203.051	0.2716	0.4104	0.6820
45	1.0843	0.000 811	0.015 220	0.016 032	79.647	125.074	204.722	0.2875	0.3931	0.6806
50	1.2193	0.000 826	0.013 344	0.014 170	84.868	121.430	206.298	0.3034	0.3758	0.6792
55	1.3663	0.000 841	0.011 701	0.012 542	90.201	117.565	207.766	0.3194	0.3582	0.6777
60	1.5259	0.000 858	0.010 253	0.011 111	95.665	113.443	209.109	0.3355	0.3405	0.6760
65	1.6988	0.000 877	0.008 971	0.009 847	101.279	109.024	210.303	0.3518	0.3224	0.6742
70	1.8858	0.000 897	0.007 828	0.008 725	107.067	104.255	211.321	0.3683	0.3038	0.6721
75	2.0874	0.000 920	0.006 802	0.007 723	113.058	99.068	212.126	0.3851	0.2845	0.6697
80	2.3046	0.000 946	0.005 875	0.006 821	119.291	93.373	212.665	0.4023	0.2644	0.6667
85	2.5380	0.000 976	0.005 029	0.006 005	125.818	87.047	212.865	0.4201	0.2430	0.6631
90	2.7885	0.001 012	0.004 246	0.005 258	132.708	79.907	212.614	0.4385	0.2200	0.6585
95	3.0569	0.001 056	0.003 508	0.004 563	140.668	71.658	211.726	0.4579	0.1946	0.6526
100	3.3440	0.001 113	0.002 790	0.003 903	148.076	61.768	209.843	0.4788	0.1655	0.6444
105	3.6509	0.001 197	0.002 045	0.003 242	157.085	49.014	206.099	0.5023	0.1296	0.6319
110	3.9784	0.001 364	0.001 098	0.002 462	168.059	28.425	196.484	0.5322	0.0742	0.6064
112	4.1155	0.001 792	0.000 005	0.001 797	174.920	0.151	175.071	0.5651	0.0004	0.5655

^aCopyright 1955 and 1956, E. I. du Pont de Nemours & Company, Inc. Reprinted by permission. Adapted from English units.

Table A.3.2
Superheated Freon-12

Temp. °C	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
	0.05 MPa			0.10 MPa			0.15 MPa		
-20.0	0.341 857	181.042	0.7912	0.167 701	179.861	0.7401			
-10.0	0.356 227	186.757	0.8133	0.175 222	185.707	0.7628	0.114 716	184.619	0.7318
0.0	0.370 508	192.567	0.8350	0.182 647	191.628	0.7849	0.119 866	190.660	0.7543
10.0	0.384 716	198.471	0.8562	0.189 994	197.628	0.8064	0.124 932	196.762	0.7763
20.0	0.398 863	204.469	0.8770	0.197 277	203.707	0.8275	0.129 930	202.927	0.7977
30.0	0.412 959	210.557	0.8974	0.204 506	209.866	0.8482	0.134 873	209.160	0.8186
40.0	0.427 012	216.733	0.9175	0.211 691	216.104	0.8684	0.139 768	215.463	0.8390
50.0	0.441 030	222.997	0.9372	0.218 839	222.421	0.8883	0.144 625	221.835	0.8591
60.0	0.455 017	229.344	0.9565	0.225 955	228.815	0.9078	0.149 450	228.277	0.8787
70.0	0.468 978	235.774	0.9755	0.233 044	235.285	0.9269	0.154 247	234.789	0.8980
80.0	0.482 917	242.282	0.9942	0.240 111	241.829	0.9457	0.159 020	241.371	0.9169
90.0	0.496 838	248.868	1.0126	0.247 159	248.446	0.9642	0.163 774	248.020	0.9354
	0.20 MPa			0.25 MPa			0.30 MPa		
0.0	0.088 608	189.669	0.7320	0.069 752	188.644	0.7139	0.057 150	187.583	0.6984
10.0	0.092 550	195.878	0.7543	0.073 024	194.969	0.7366	0.059 984	194.034	0.7216
20.0	0.096 418	202.135	0.7760	0.076 218	201.322	0.7587	0.062 734	200.490	0.7440
30.0	0.100 228	208.446	0.7972	0.079 350	207.715	0.7801	0.065 418	206.969	0.7658
40.0	0.103 989	214.814	0.8178	0.082 431	214.153	0.8010	0.068 049	213.480	0.7869
50.0	0.107 710	221.243	0.8381	0.085 470	220.642	0.8214	0.070 635	220.030	0.8075
60.0	0.111 397	227.735	0.8578	0.088 474	227.185	0.8413	0.073 185	226.627	0.8276
70.0	0.115 055	234.291	0.8772	0.091 449	233.785	0.8608	0.075 705	233.273	0.8473
80.0	0.118 690	240.910	0.8962	0.094 398	240.443	0.8800	0.078 200	239.971	0.8665
90.0	0.122 304	247.593	0.9149	0.097 327	247.160	0.8987	0.080 673	246.723	0.8853
100.0	0.125 901	254.339	0.9332	0.100 238	253.936	0.9171	0.083 127	253.530	0.9038
110.0	0.129 483	261.147	0.9512	0.103 134	260.770	0.9352	0.085 566	260.391	0.9220
	0.40 MPa			0.50 MPa			0.60 MPa		
20.0	0.045 836	198.762	0.7199	0.035 646	196.935	0.6999			
30.0	0.047 971	205.428	0.7423	0.037 464	203.814	0.7230	0.030 422	202.116	0.7063
40.0	0.050 046	212.095	0.7639	0.039 214	210.656	0.7452	0.031 966	209.154	0.7291
50.0	0.052 072	218.779	0.7849	0.040 911	217.484	0.7667	0.033 450	216.141	0.7511
60.0	0.054 059	225.488	0.8054	0.042 565	224.315	0.7875	0.034 887	223.104	0.7723
70.0	0.056 014	232.230	0.8253	0.044 184	231.161	0.8077	0.036 285	230.062	0.7929
80.0	0.057 941	239.012	0.8448	0.045 774	238.031	0.8275	0.037 653	237.027	0.8129
90.0	0.059 846	245.837	0.8638	0.047 340	244.932	0.8467	0.038 995	244.009	0.8324
100.0	0.061 731	252.707	0.8825	0.048 886	251.869	0.8656	0.040 316	251.016	0.8514
110.0	0.063 600	259.624	0.9008	0.050 415	258.845	0.8840	0.041 619	258.053	0.8700
120.0	0.065 455	266.590	0.9187	0.051 929	265.862	0.9021	0.042 907	265.124	0.8882
130.0	0.067 298	273.605	0.9364	0.053 430	272.923	0.9198	0.044 181	272.231	0.9061
	0.70 MPa			0.80 MPa			0.90 MPa		
40.0	0.026 761	207.580	0.7148	0.022 830	205.924	0.7016	0.019 744	204.170	0.6982
50.0	0.028 100	214.745	0.7373	0.024 068	213.290	0.7248	0.020 912	211.765	0.7131
60.0	0.029 387	221.854	0.7590	0.025 247	220.558	0.7469	0.022 012	219.212	0.7358
70.0	0.030 632	228.931	0.7799	0.026 380	227.766	0.7682	0.023 062	226.564	0.7575
80.0	0.031 843	235.997	0.8002	0.027 477	234.941	0.7888	0.024 072	233.856	0.7785
90.0	0.033 027	243.066	0.8199	0.028 545	242.101	0.8088	0.025 051	241.113	0.7987
100.0	0.034 189	250.146	0.8392	0.029 588	249.260	0.8283	0.026 005	248.355	0.8184
110.0	0.035 332	257.247	0.8579	0.030 612	256.428	0.8472	0.026 937	255.593	0.8376
120.0	0.036 458	264.374	0.8763	0.031 619	263.613	0.8657	0.027 851	262.839	0.8562
130.0	0.037 572	271.531	0.8943	0.032 612	270.820	0.8838	0.028 751	270.100	0.8745
140.0	0.038 673	278.720	0.9119	0.033 592	278.055	0.9016	0.029 639	277.381	0.8923
150.0	0.039 764	285.946	0.9292	0.034 563	285.320	0.9189	0.030 515	284.687	0.9098

Table A.3.2 (Continued)
Superheated Freon-12

Temp. °C	<i>v</i> m ³ /kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg K
1.00 MPa			1.20 MPa			1.40 MPa			
50.0	0.018 366	210.162	0.7021	0.014 483	206.661	0.6812			
60.0	0.019 410	217.810	0.7254	0.015 463	214.805	0.7060	0.012 579	211.457	0.6876
70.0	0.020 397	225.319	0.7476	0.016 368	222.687	0.7293	0.013 448	219.822	0.7123
80.0	0.021 341	232.739	0.7689	0.017 221	230.398	0.7514	0.014 247	227.891	0.7355
90.0	0.022 251	240.101	0.7895	0.018 032	237.995	0.7727	0.014 997	235.766	0.7575
100.0	0.023 133	247.430	0.8094	0.018 812	245.518	0.7931	0.015 710	243.512	0.7785
110.0	0.023 993	254.743	0.8287	0.019 567	252.993	0.8129	0.016 393	251.170	0.7988
120.0	0.024 835	262.053	0.8475	0.020 301	260.441	0.8320	0.017 053	258.770	0.8183
130.0	0.025 661	269.369	0.8659	0.021 018	267.875	0.8507	0.017 695	266.334	0.8373
140.0	0.026 474	276.699	0.8839	0.021 721	275.307	0.8689	0.018 321	273.877	0.8558
150.0	0.027 275	284.047	0.9015	0.022 412	282.745	0.8867	0.018 934	281.411	0.8738
160.0	0.028 068	291.419	0.9187	0.023 093	290.195	0.9041	0.019 535	288.946	0.8914
1.60 MPa			1.80 MPa			2.00 MPa			
70.0	0.011 208	216.650	0.6959	0.009 406	213.049	0.6794			
80.0	0.011 984	225.177	0.7204	0.010 187	222.198	0.7057	0.008 704	218.859	0.6909
90.0	0.012 698	233.390	0.7433	0.010 884	230.835	0.7298	0.009 406	228.056	0.7166
100.0	0.013 366	241.397	0.7651	0.011 526	239.155	0.7524	0.010 035	236.760	0.7402
110.0	0.014 000	249.264	0.7859	0.012 126	247.264	0.7739	0.010 615	245.154	0.7624
120.0	0.014 608	257.035	0.8059	0.012 697	255.228	0.7944	0.011 159	253.341	0.7835
130.0	0.015 195	264.742	0.8253	0.013 244	263.094	0.8141	0.011 676	261.384	0.8037
140.0	0.015 765	272.406	0.8440	0.013 772	270.891	0.8332	0.012 172	269.327	0.8232
150.0	0.016 320	280.044	0.8623	0.014 284	278.642	0.8518	0.012 651	277.201	0.8420
160.0	0.016 864	287.669	0.8801	0.014 784	286.364	0.8698	0.013 116	285.027	0.8603
170.0	0.017 398	295.290	0.8975	0.015 272	294.069	0.8874	0.013 570	292.822	0.8781
180.0	0.017 923	302.914	0.9145	0.015 752	301.767	0.9046	0.014 013	300.598	0.8955
2.50 MPa			3.00 MPa			3.50 MPa			
90.0	0.006 595	219.562	0.6823						
100.0	0.007 264	229.852	0.7103	0.005 231	220.529	0.6770			
110.0	0.007 837	239.271	0.7352	0.005 886	232.068	0.7075	0.004 324	222.121	0.6750
120.0	0.008 351	248.192	0.7582	0.006 419	242.208	0.7336	0.004 959	234.875	0.7078
130.0	0.008 827	256.794	0.7798	0.006 887	251.632	0.7573	0.005 456	245.661	0.7349
140.0	0.009 273	265.180	0.8003	0.007 313	260.620	0.7793	0.005 884	255.524	0.7591
150.0	0.009 697	273.414	0.8200	0.007 709	269.319	0.8001	0.006 270	264.846	0.7814
160.0	0.010 104	281.540	0.8390	0.008 083	277.817	0.8200	0.006 626	273.817	0.8023
170.0	0.010 497	289.589	0.8574	0.008 439	286.171	0.8391	0.006 961	282.545	0.8222
180.0	0.010 879	297.583	0.8752	0.008 782	294.422	0.8575	0.007 279	291.100	0.8413
190.0	0.011 250	305.540	0.8926	0.009 114	302.597	0.8753	0.007 584	299.528	0.8597
200.0	0.011 614	313.472	0.9095	0.009 436	310.718	0.8927	0.007 878	307.864	0.8775
4.00 MPa									
120.0	0.003 736	224.863	0.6771						
130.0	0.004 325	238.443	0.7111						
140.0	0.004 781	249.703	0.7386						
150.0	0.005 172	259.904	0.7630						
160.0	0.005 522	269.492	0.7854						
170.0	0.005 845	278.684	0.8063						
180.0	0.006 147	287.602	0.8262						
190.0	0.006 434	296.326	0.8453						
200.0	0.006 708	304.906	0.8636						
210.0	0.006 972	313.380	0.8813						
220.0	0.007 228	321.774	0.8985						
230.0	0.007 477	330.108	0.9152						

Table A.4
Thermodynamic Properties of Oxygen^a
Table A.4.1
Saturated Oxygen

Temp. K	Press. MPa P	Specific Volume m ³ /kg			Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg K		
		Sat. Liquid v_f	Evap. v_{fg}	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g	Sat. Liquid s_f	Evap. s_{fg}	Sat. Vapor s_g
54.3507	0.00015	0.000 765	92.9658	92.9666	-193.432	242.553	49.121	2.0938	4.4514	6.5452
60	0.00073	0.000 780	21.3461	21.3469	-184.029	238.265	54.236	2.2585	3.9686	6.2271
70	0.00623	0.000 808	2.9085	2.9093	-167.372	230.527	63.155	2.5151	3.2936	5.8087
80	0.03006	0.000 840	0.681 04	0.681 88	-150.646	222.289	71.643	2.7382	2.7779	5.5161
90	0.09943	0.000 876	0.226 49	0.227 36	-133.758	213.070	79.312	2.9364	2.3663	5.3027
100	0.25425	0.000 917	0.094 645	0.095 562	-116.557	202.291	85.734	3.1161	2.0222	5.1383
110	0.54339	0.000 966	0.045 855	0.046 821	-98.829	189.320	90.491	3.2823	1.7210	5.0033
120	1.0215	0.001 027	0.024 336	0.025 363	-80.219	173.310	93.091	3.4401	1.4445	4.8816
130	1.7478	0.001 108	0.013 488	0.014 596	-60.093	152.887	92.794	3.5948	1.1766	4.7714
140	2.7866	0.001 230	0.007 339	0.008 569	-37.045	125.051	88.006	3.7567	0.8935	4.6502
150	4.2190	0.001 480	0.003 180	0.004 660	-7.038	79.459	72.421	3.9498	0.5301	4.4799
154.576	5.0427	0.002 293	0.000 000	0.002 293	32.257	0.000	32.257	4.1977	0.0000	4.1977

^aAdapted from L. A. Weber, *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 74A: 93 (1970).

Table A.4.2
Superheated Oxygen

Temp. K	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
0.10 MPa			0.20 MPa			0.50 MPa			
100	0.253 503	88.828	5.4016	0.123 394	86.864	5.2083			
125	0.320 717	112.214	5.6107	0.158 268	110.988	5.4241	0.060 674	107.093	5.1650
150	0.386 914	135.301	5.7787	0.192 016	134.440	5.5947	0.075 039	131.788	5.3448
175	0.452 645	158.255	5.9202	0.225 276	157.609	5.7376	0.088 842	155.643	5.4919
200	0.518 127	181.145	6.0427	0.258 282	180.638	5.8609	0.102 371	179.105	5.6175
225	0.583 465	204.007	6.1502	0.291 140	203.596	5.9688	0.115 746	202.359	5.7268
250	0.648 711	226.869	6.2468	0.323 906	226.529	6.0657	0.129 025	225.506	5.8246
275	0.713 895	249.769	6.3369	0.356 610	249.483	6.1560	0.142 242	248.621	5.9156
300	0.779 036	272.720	6.4140	0.389 271	272.475	6.2332	0.155 415	271.740	5.9932
1.00 MPa			2.00 MPa			4.00 MPa			
125	0.027 869	99.653	4.9431						
150	0.035 976	127.112	5.1433	0.016 270	116.476	4.9130	0.005 526	81.481	4.5475
175	0.043 341	152.269	5.2986	0.020 544	145.112	5.0899	0.009 029	128.618	4.8411
200	0.050 394	176.508	5.4283	0.024 395	171.150	5.2293	0.011 376	159.715	5.0080
225	0.057 282	200.280	5.5101	0.028 051	196.052	5.3464	0.013 444	187.333	5.1380
250	0.064 068	223.795	5.6394	0.031 597	220.348	5.4491	0.015 378	213.374	5.2480
275	0.070 790	247.185	5.7314	0.035 073	244.309	5.5433	0.017 233	238.560	5.3469
300	0.077 467	270.516	5.8098	0.038 502	268.076	5.6263	0.019 039	263.234	5.4300

Table A.4.2 (Continued)
Superheated Oxygen

Temp. K	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
6.00 MPa			8.00 MPa			10.00 MPa			
175	0.005 051	107.496	4.6431	0.003 002	79.513	4.4384	0.002 020	52.661	4.2573
200	0.007 027	147.232	4.8565	0.004 864	133.760	4.7308	0.003 603	119.767	4.6189
225	0.008 589	178.304	5.0029	0.006 181	169.069	4.8973	0.004 757	159.686	4.8072
250	0.009 991	206.340	5.1214	0.007 316	199.317	5.0251	0.005 730	192.401	4.9455
275	0.011 306	232.848	5.2253	0.008 360	227.219	5.1344	0.006 606	221.685	5.0572
300	0.012 570	258.464	5.3116	0.009 351	253.797	5.2240	0.007 432	249.262	5.1533
20.00 MPa									
175	0.001 343	24.551	4.0086						
200	0.001 727	75.318	4.2798						
225	0.002 236	122.595	4.5024						
250	0.002 755	163.109	4.6739						
275	0.003 241	198.021	4.8069						
300	0.003 700	229.655	4.9174						

Table A.5
Thermodynamic Properties of Nitrogen^a

Table A.5.1
Saturated Nitrogen

Temp. K	Press. MPa P	Specific Volume m ³ /kg			Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg K		
		Sat. Liquid v_f	Evap. v_{fg}	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g	Sat. Liquid s_f	Evap. s_{fg}	Sat. Vapor s_g
63.143	0.01253	0.001 152	1.480 060	1.481 212	-150.348	215.188	64.840	2.4310	3.4076	5.8386
65	0.01742	0.001 162	1.093 173	1.094 335	-146.691	213.291	66.600	2.4845	3.2849	5.7694
70	0.03858	0.001 189	0.525 785	0.526 974	-136.569	207.727	71.158	2.6345	2.9703	5.6048
75	0.07612	0.001 221	0.280 970	0.282 191	-126.287	201.662	75.375	2.7755	2.6915	5.4670
77.347	0.101325	0.001 237	0.215 504	0.216 741	-121.433	198.645	77.212	2.8390	2.5706	5.4096
80	0.1370	0.001 256	0.162 794	0.164 050	-115.926	195.089	79.163	2.9083	2.4409	5.3492
85	0.2291	0.001 296	0.100 434	0.101 730	-105.461	187.892	82.431	3.0339	2.2122	5.2461
90	0.3608	0.001 340	0.064 950	0.066 290	-94.817	179.894	85.077	3.1535	2.0001	5.1536
95	0.5411	0.001 392	0.043 504	0.044 896	-83.895	170.877	86.982	3.2688	1.7995	5.0683
100	0.7790	0.001 452	0.029 861	0.031 313	-72.571	160.562	87.991	3.3816	1.6060	4.9876
105	1.0843	0.001 524	0.020 745	0.022 269	-60.691	148.573	87.882	3.4930	1.4150	4.9080
110	1.4673	0.001 613	0.014 402	0.016 015	-48.027	134.319	86.292	3.6054	1.2209	4.8263
115	1.9395	0.001 797	0.009 696	0.011 493	-34.157	116.701	82.544	3.7214	1.0145	4.7359
120	2.5135	0.001 904	0.006 130	0.008 034	-18.017	93.092	75.075	3.8450	0.7803	4.6253
125	3.2079	0.002 323	0.002 568	0.004 891	+6.202	50.114	56.316	4.0356	0.3989	4.4345
126.1	3.4000	0.003 184	0.000 000	0.003 184	+30.791	0.000	30.791	4.2269	0.0000	4.2269

^aAdapted from "Thermodynamic Properties of Nitrogen Including Liquid and Vapor Phases from 63 K to 2000 K with Pressures to 10,000 Bar," R. T. Jacobsen and R. R. Stewart, *Jour. of Phys. and Chem. Ref. Data*, 2: 757-922 (1973).

Table A.5.2
Superheated Nitrogen

Temp. K	v	h	s	v	h	s	v	h	s
	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg K	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg K	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg K
	0.1 MPa			0.2 MPa			0.5 MPa		
100	0.290 978	101.965	5.6944	0.142 475	100.209	5.4767	0.055 520	94.345	5.1706
125	0.367 217	128.505	5.9313	0.181 711	127.371	5.7194	0.073 422	123.824	5.4343
150	0.442 619	154.779	6.1228	0.220 014	153.962	5.9132	0.090 150	151.470	5.6361
175	0.517 576	180.935	6.2841	0.257 890	180.314	6.0760	0.106 394	178.434	5.8025
200	0.592 288	207.029	6.4234	0.295 531	206.537	6.2160	0.122 394	205.063	5.9447
225	0.666 552	233.085	6.5460	0.332 841	232.690	6.3388	0.138 173	231.459	6.0690
250	0.741 375	259.122	6.6561	0.370 418	258.796	6.4491	0.154 006	257.828	6.1801
275	0.815 563	285.144	6.7550	0.407 619	284.876	6.5485	0.169 642	284.076	6.2800
300	0.890 205	311.158	6.8457	0.445 047	310.937	6.6393	0.185 346	310.273	6.3715
	1.0 MPa			2.0 MPa			4.0 MPa		
125	0.033 065	117.422	5.1872	0.014 021	101.489	4.8878			
150	0.041 884	147.176	5.4042	0.019 546	137.916	5.1547	0.008 234	115.716	4.8384
175	0.050 125	175.255	5.5779	0.024 155	168.709	5.3449	0.011 186	154.851	5.0804
200	0.058 096	202.696	5.7237	0.028 436	197.609	5.4992	0.013 648	187.521	5.2553
225	0.065 875	229.526	5.8502	0.035 697	225.578	5.6309	0.015 894	217.757	5.3976
250	0.073 634	256.220	5.9632	0.036 557	253.032	5.7469	0.018 060	246.793	5.5202
275	0.081 260	282.720	6.0639	0.040 485	280.132	5.8501	0.020 133	275.056	5.6277
300	0.088 899	309.173	6.1563	0.044 398	307.014	5.9436	0.022 178	302.848	5.7248
	6.0 MPa			8.0 MPa			10.0 MPa		
150	0.004 413	87.090	4.5667	0.002 917	61.903	4.3518	0.002 388	48.687	4.2287
175	0.006 913	140.183	4.8966	0.004 863	125.536	4.7470	0.003 750	112.489	4.6239
200	0.008 772	177.447	5.0961	0.006 390	167.680	4.9726	0.005 016	158.578	4.8709
225	0.010 396	210.139	5.2410	0.007 691	202.867	5.1384	0.006 104	196.079	5.0474
250	0.011 934	240.806	5.3796	0.008 903	235.141	5.2750	0.007 112	229.861	5.1900
275	0.013 383	270.222	5.4917	0.010 034	265.676	5.3910	0.008 046	261.450	5.3103
300	0.014 800	298.907	5.5916	0.011 133	295.219	5.4942	0.008 950	291.800	5.4163
	15.0 MPa			20.0 MPa					
150	0.001 956	36.922	4.0798	0.001 781	33.637	3.9956			
175	0.002 603	92.284	4.4213	0.002 186	83.453	4.3029			
200	0.003 369	140.886	4.6813	0.002 685	130.291	4.5535			
225	0.004 106	182.034	4.8752	0.003 208	172.307	4.7511			
250	0.004 808	218.710	5.0303	0.003 728	210.456	4.9127			
275	0.005 461	252.465	5.1845	0.004 223	245.640	5.0467			
300	0.006 091	284.523	5.2707	0.004 704	278.942	5.1629			

Table A.6
Thermodynamic Properties of Saturated Mercury^a

Press., MPa	Temp., °C	Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg K			Specific Volume Sat. Vapor, m ³ /kg
		Sat. Liquid	Evap.	Sat. Vapor	Sat. Liquid	Evap.	Sat. Vapor	
0.000 06	109.2	15.13	297.20	312.33	0.0466	0.7774	0.8240	259.6
0.000 07	112.3	15.55	297.14	312.69	0.0477	0.7709	0.8186	224.3
0.000 08	115.0	15.93	297.09	313.02	0.0487	0.7654	0.8141	197.7
0.000 09	117.5	16.27	297.04	313.31	0.0496	0.7604	0.8100	176.8
0.000 10	119.7	16.58	297.00	313.58	0.0503	0.7560	0.8063	160.1
0.0002	134.9	18.67	296.71	315.38	0.0556	0.7271	0.7827	83.18
0.0004	151.5	20.93	296.40	317.33	0.0610	0.6981	0.7591	43.29
0.0006	161.8	22.33	296.21	318.54	0.0643	0.6811	0.7454	29.57
0.0008	169.4	23.37	296.06	319.43	0.0666	0.6690	0.7356	22.57
0.0010	175.5	24.21	295.95	320.16	0.0685	0.6596	0.7281	18.31
0.002	195.6	26.94	295.57	322.51	0.0744	0.6305	0.7049	9.570
0.004	217.7	29.92	295.15	325.07	0.0806	0.6013	0.6819	5.013
0.006	231.6	31.81	294.89	326.70	0.0843	0.5842	0.6685	3.438
0.008	242.0	33.21	294.70	327.91	0.0870	0.5721	0.6591	2.632
0.010	250.3	34.33	294.54	328.87	0.0892	0.5627	0.6519	2.140
0.02	278.1	38.05	294.02	332.07	0.0961	0.5334	0.6295	1.128
0.04	309.1	42.21	293.43	335.64	0.1034	0.5039	0.6073	0.5942
0.06	329.0	44.85	293.06	337.91	0.1078	0.4869	0.5947	0.4113
0.08	343.9	46.84	292.78	339.62	0.1110	0.4745	0.5855	0.3163
0.1	356.1	48.45	292.55	341.00	0.1136	0.4649	0.5785	0.2581
0.2	397.1	53.87	291.77	345.64	0.1218	0.4353	0.5571	0.1377
0.3	423.8	57.38	291.27	348.65	0.1268	0.4179	0.5447	0.095 51
0.4	444.1	60.03	290.89	350.92	0.1305	0.4056	0.5361	0.073 78
0.5	460.7	62.20	290.58	352.78	0.1334	0.3960	0.5294	0.060 44
0.6	474.9	64.06	290.31	354.37	0.1359	0.3881	0.5240	0.051 37
0.7	487.3	65.66	290.08	355.74	0.1380	0.3815	0.5195	0.044 79
0.8	498.4	67.11	289.87	356.98	0.1398	0.3757	0.5155	0.039 78
0.9	508.5	68.42	289.68	358.10	0.1415	0.3706	0.5121	0.035 84
1.0	517.8	69.61	289.50	359.11	0.1429	0.3660	0.5089	0.032 66
1.2	534.4	71.75	289.19	360.94	0.1455	0.3581	0.5036	0.027 81
1.4	549.0	73.63	288.92	362.55	0.1478	0.3514	0.4992	0.024 29
1.6	562.0	75.37	288.67	364.04	0.1498	0.3456	0.4954	0.021 61
1.8	574.0	76.83	288.45	365.28	0.1515	0.3405	0.4920	0.019 49
2.0	584.9	78.23	288.24	366.47	0.1531	0.3359	0.4890	0.017 78
2.2	595.1	79.54	288.05	367.59	0.1546	0.3318	0.4864	0.016 37
2.4	604.6	80.75	287.87	368.62	0.1559	0.3280	0.4839	0.015 18
2.6	613.5	81.89	287.70	369.59	0.1571	0.3245	0.4816	0.014 16
2.8	622.0	82.96	287.54	370.50	0.1583	0.3212	0.4795	0.013 29
3.0	630.0	83.97	287.39	371.36	0.1594	0.3182	0.4776	0.012 52
3.5	648.5	86.33	287.04	373.37	0.1619	0.3115	0.4734	0.010 96
4.0	665.1	88.43	286.73	375.16	0.1641	0.3056	0.4697	0.009 78

Table A.6 (Continued)
Thermodynamic Properties of Saturated Mercury^a

Press., MPa	Temp., °C	Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg K			Specific Volume Sat. Vapor, m ³ /kg
		Sat. Liquid	Evap.	Sat. Vapor	Sat. Liquid	Evap.	Sat. Vapor	
4.5	680.3	90.35	286.44	376.79	0.1660	0.3004	0.4664	0.008 85
5.0	694.4	92.11	286.18	378.29	0.1678	0.2958	0.4636	0.008 09
5.5	707.4	93.76	285.93	379.69	0.1694	0.2916	0.4610	0.007 46
6.0	719.7	95.30	285.70	381.00	0.1709	0.2878	0.4587	0.006 93
6.5	731.3	96.75	285.48	382.23	0.1723	0.2842	0.4565	0.006 48
7.0	742.9	98.12	285.28	383.40	0.1736	0.2809	0.4545	0.006 09
7.5	752.7	99.42	285.08	384.50	0.1748	0.2779	0.4527	0.005 75

^a Adapted from *Thermodynamic Properties of Mercury Vapor*, by Lucian A. Sheldon. ASME, 49A, 30 (1949).

Table A.7
Critical Constants^a

Substance	Formula	Molecular Weight	Temp. K	Pressure MPa	Volume m ³ /kmol
Ammonia	NH ₃	17.03	405.5	11.28	.0724
Argon	Ar	39.948	151	4.86	.0749
Bromine	Br ₂	159.808	584	10.34	.1355
Carbon Dioxide	CO ₂	44.01	304.2	7.39	.0943
Carbon Monoxide	CO	28.011	133	3.50	.0930
Chlorine	Cl ₂	70.906	417	7.71	.1242
Deuterium (Normal)	D ₂	4.00	38.4	1.66	—
Helium	He	4.003	5.3	0.23	.0578
Helium ³	He	3.00	3.3	0.12	—
Hydrogen (Normal)	H ₂	2.016	33.3	1.30	.0649
Krypton	Kr	83.80	209.4	5.50	.0924
Neon	Ne	20.183	44.5	2.73	.0417
Nitrogen	N ₂	28.013	126.2	3.39	.0899
Nitrous Oxide	N ₂ O	44.013	309.7	7.27	.0961
Oxygen	O ₂	31.999	154.8	5.08	.0780
Sulfur Dioxide	SO ₂	64.063	430.7	7.88	.1217
Water	H ₂ O	18.015	647.3	22.09	.0568
Xenon	Xe	131.30	289.8	5.88	.1186
Benzene	C ₆ H ₆	78.115	562	4.92	.2603
n-Butane	C ₄ H ₁₀	58.124	425.2	3.80	.2547
Carbon Tetrachloride	CCl ₄	153.82	556.4	4.56	.2759
Chloroform	CHCl ₃	119.38	536.6	5.47	.2403
Dichlorodifluoromethane	CCl ₂ F ₂	120.91	384.7	4.01	.2179
Dichlorofluoromethane	CHCl ₂ F	102.92	451.7	5.17	.1973
Ethane	C ₂ H ₆	30.070	305.5	4.88	.1480
Ethyl Alcohol	C ₂ H ₅ OH	46.07	516	6.38	.1673
Ethylene	C ₂ H ₄	28.054	282.4	5.12	.1242
n-Hexane	C ₆ H ₁₄	86.178	507.9	3.03	.3677
Methane	CH ₄	16.043	191.1	4.64	.0993
Methyl Alcohol	CH ₃ OH	32.042	513.2	7.95	.1180
Methyl Chloride	CH ₃ Cl	50.488	416.3	6.68	.1430
Propane	C ₃ H ₈	44.097	370	4.26	.1998
Propene	C ₃ H ₆	42.081	365	4.62	.1810
Propyne	C ₃ H ₄	40.065	401	5.35	—
Trichlorofluoromethane	CCl ₃ F	137.37	471.2	4.38	.2478

^aK. A. Kobe and R. E. Lynn, Jr., *Chem. Rev.*, 52: 117-236 (1953).

Table A.8
Properties of Various Ideal Gases^a

Gas	Chemical Formula	Molecular Weight	$R \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$	$C_{p0} \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$	$C_{v0} \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$	k
Air	—	28.97	0.287 00	1.0035	0.7165	1.400
Argon	Ar	39.948	0.208 13	0.5203	0.3122	1.667
Butane	C ₄ H ₁₀	58.124	0.143 04	1.7164	1.5734	1.091
Carbon Dioxide	CO ₂	44.01	0.188 92	0.8418	0.6529	1.289
Carbon Monoxide	CO	28.01	0.296 83	1.0413	0.7445	1.400
Ethane	C ₂ H ₆	30.07	0.276 50	1.7662	1.4897	1.186
Ethylene	C ₂ H ₄	28.054	0.296 37	1.5482	1.2518	1.237
Helium	He	4.003	2.077 03	5.1926	3.1156	1.667
Hydrogen	H ₂	2.016	4.124 18	14.2091	10.0849	1.409
Methane	CH ₄	16.04	0.518 35	2.2537	1.7354	1.299
Neon	Ne	20.183	0.411 95	1.0299	0.6179	1.667
Nitrogen	N ₂	28.013	0.296 80	1.0416	0.7448	1.400
Octane	C ₈ H ₁₈	114.23	0.072 79	1.7113	1.6385	1.044
Oxygen	O ₂	31.999	0.259 83	0.9216	0.6618	1.393
Propane	C ₃ H ₈	44.097	0.188 55	1.6794	1.4909	1.126
Steam	H ₂ O	18.015	0.461 52	1.8723	1.4108	1.327

^a(C_{p0} , C_{v0} , and k are at 300 K).

Table A.9
Constant-Pressure Specific Heats of Various Ideal Gases^a

$\bar{C}_{p0} = \text{kJ} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$			
$\theta = T(\text{Kelvin})/100$			
Gas		Range K	Max. Error %
N ₂	$\bar{C}_{p0} = 39.060 - 512.79\theta^{-1.5} + 1072.7\theta^{-2} - 820.40\theta^{-3}$	300-3500	0.43
O ₂	$\bar{C}_{p0} = 37.432 + 0.020102\theta^{1.5} - 178.57\theta^{-1.5} + 236.88\theta^{-2}$	300-3500	0.30
H ₂	$\bar{C}_{p0} = 56.505 - 702.74\theta^{-0.75} + 1165.0\theta^{-1} - 560.70\theta^{-1.5}$	300-3500	0.60
CO	$\bar{C}_{p0} = 69.145 - 0.70463\theta^{0.75} - 200.77\theta^{-0.5} + 176.76\theta^{-0.75}$	300-3500	0.42
OH	$\bar{C}_{p0} = 81.546 - 59.350\theta^{0.25} + 17.329\theta^{0.75} - 4.2660\theta$	300-3500	0.43
NO	$\bar{C}_{p0} = 59.283 - 1.7096\theta^{0.5} - 70.613\theta^{-0.5} + 74.889\theta^{-1.5}$	300-3500	0.34
H ₂ O	$\bar{C}_{p0} = 143.05 - 183.54\theta^{0.25} + 82.751\theta^{0.5} - 3.6989\theta$	300-3500	0.43
CO ₂	$\bar{C}_{p0} = -3.7357 + 30.529\theta^{0.5} - 4.1034\theta + 0.024198\theta^2$	300-3500	0.19

Table A.9 (Continued)

Gas		Range K	Max. Error %
NO ₂	$\bar{C}_{p0} = 46.045 + 216.10\theta^{-0.5} - 363.66\theta^{-0.75} + 232.550\theta^{-2}$	300-3500	0.26
CH ₄	$\bar{C}_{p0} = -672.87 + 439.74\theta^{0.25} - 24.875\theta^{0.75} + 323.88\theta^{-0.5}$	300-2000	0.15
C ₂ H ₄	$\bar{C}_{p0} = -95.395 + 123.15\theta^{0.5} - 35.641\theta^{0.75} + 182.77\theta^{-0.3}$	300-2000	0.07
C ₂ H ₆	$\bar{C}_{p0} = 6.895 + 17.26\theta - 0.6402\theta^2 + 0.00728\theta^3$	300-1500	0.83
C ₃ H ₈	$\bar{C}_{p0} = -4.042 + 30.46\theta - 1.571\theta^2 + 0.03171\theta^3$	300-1500	0.40
C ₄ H ₁₀	$\bar{C}_{p0} = 3.954 + 37.12\theta - 1.833\theta^2 + 0.03498\theta^3$	300-1500	0.54

^aFrom T. C. Scott and R. E. Sonntag, Univ. of Michigan, unpublished (1971), except C₂H₄, C₃H₈, C₄H₁₀ from K. A. Kobe, Petroleum Refiner 28 No. 2, 113 (1949).

Table A.10
Thermodynamic Properties of Air at Low Pressure^a

T, K	h, kJ/kg	P _r	u, kJ/kg	v _r	s ^o , kJ/kg K
100	99.76	0.029 90	71.06	2230	1.4143
110	109.77	0.041 71	78.20	1758.4	1.5098
120	119.79	0.056 52	85.34	1415.7	1.5971
130	129.81	0.074 74	92.51	1159.8	1.6773
140	139.84	0.096 81	99.67	964.2	1.7515
150	149.86	0.123 18	106.81	812.0	1.8206
160	159.87	0.154 31	113.95	691.4	1.8853
170	169.89	0.190 68	121.11	594.5	1.9461
180	179.92	0.232 79	128.28	515.6	2.0033
190	189.94	0.281 14	135.40	450.6	2.0575
200	199.96	0.3363	142.56	396.6	2.1088
210	209.97	0.3987	149.70	351.2	2.1577
220	219.99	0.4690	156.84	312.8	2.2043
230	230.01	0.5477	163.98	280.0	2.2489
240	240.03	0.6355	171.15	251.8	2.2915
250	250.05	0.7329	178.29	227.45	2.3325
260	260.09	0.8405	185.45	206.26	2.3717
270	270.12	0.9590	192.59	187.74	2.4096
280	280.14	1.0889	199.78	171.45	2.4461
290	290.17	1.2311	206.92	157.07	2.4813
300	300.19	1.3860	214.09	144.32	2.5153
310	310.24	1.5546	221.27	132.96	2.5483
320	320.29	1.7375	228.45	122.81	2.5802
330	330.34	1.9352	235.65	113.70	2.6111
340	340.43	2.149	242.86	105.51	2.6412

Table A.10 (Continued)

T, K	h, kJ/kg	P _r	u, kJ/kg	v _r	s ^o , kJ/kg K
350	350.48	2.379	250.05	98.11	2.6704
360	360.58	2.626	257.23	91.40	2.6987
370	370.67	2.892	264.47	85.31	2.7264
380	380.77	3.176	271.72	79.77	2.7534
390	390.88	3.481	278.96	74.71	2.7796
400	400.98	3.806	286.19	70.07	2.8052
410	411.12	4.153	293.45	65.83	2.8302
420	421.26	4.522	300.73	61.93	2.8547
430	431.43	4.915	308.03	58.34	2.8786
440	441.61	5.332	315.34	55.02	2.9020
450	451.83	5.775	322.66	51.96	2.9249
460	462.01	6.245	329.99	49.11	2.9473
470	472.25	6.742	337.34	46.48	2.9693
480	482.48	7.268	344.74	44.04	2.9909
490	492.74	7.824	352.11	41.76	3.0120
500	503.02	8.411	359.53	39.64	3.0328
510	513.32	9.031	366.97	37.65	3.0532
520	523.63	9.684	374.39	35.80	3.0733
530	533.98	10.372	381.88	34.07	3.0930
540	544.35	11.097	389.40	32.45	3.1124
550	554.75	11.858	396.89	30.92	3.1314
560	565.17	12.659	404.44	29.50	3.1502
570	575.57	13.500	411.98	28.15	3.1686
580	586.04	14.382	419.56	26.89	3.1868
590	596.53	15.309	427.17	25.70	3.2047
600	607.02	16.278	434.80	24.58	3.2223
610	617.53	17.297	442.43	23.51	3.2397
620	628.07	18.360	450.13	22.52	3.2569
630	638.65	19.475	457.83	21.57	3.2738
640	649.21	20.64	465.55	20.674	3.2905
650	659.84	21.86	473.32	19.828	3.3069
660	670.47	23.13	481.06	19.026	3.3232
670	681.15	24.46	488.88	18.266	3.3392
680	691.82	25.85	496.65	17.543	3.3551

690	702.52	27.29	504.51	16.857	3.3707
700	713.27	28.80	512.37	16.205	3.3861
710	724.01	30.38	520.26	15.585	3.4014
720	734.20	31.92	527.72	15.027	3.4156
730	743.62	33.72	536.12	14.434	3.4314
740	756.44	35.50	544.05	13.900	3.4461
750	767.30	37.35	552.05	13.391	3.4607
760	778.21	39.27	560.08	12.905	3.4751
770	789.10	41.27	568.10	12.440	3.4894
780	800.03	43.35	576.15	11.998	3.5035
790	810.98	45.51	584.22	11.575	3.5174

Table A.10 (Continued)

T , K	h , kJ/kg	P_r	u , kJ/kg	v_r	s° , kJ/kg K
800	821.94	47.75	592.34	11.172	3.5312
810	832.96	50.08	600.46	10.785	3.5449
820	843.97	52.49	608.62	10.416	3.5584
830	855.01	55.00	616.79	10.062	3.5718
840	866.09	57.60	624.97	9.724	3.5850
850	877.16	60.29	633.21	9.400	3.5981
860	888.28	63.09	641.44	9.090	3.6111
870	899.42	65.98	649.70	8.792	3.6240
880	910.56	68.98	658.00	8.507	3.6367
890	921.75	72.08	666.31	8.233	3.6493
900	932.94	75.29	674.63	7.971	3.6619
910	944.15	78.61	682.98	7.718	3.6743
920	955.38	82.05	691.33	7.476	3.6865
930	966.64	85.60	699.73	7.244	3.6987
940	977.92	89.28	708.13	7.020	3.7108
950	989.22	93.08	716.57	6.805	3.7227
960	1000.53	97.00	725.01	6.599	3.7346
970	1011.88	101.06	733.48	6.400	3.7463
980	1023.25	105.24	741.99	6.209	3.7580
990	1034.63	109.57	750.48	6.025	3.7695
1000	1046.03	114.03	759.02	5.847	3.7810
1020	1068.89	123.12	775.67	5.521	3.8030
1040	1091.85	133.34	793.35	5.201	3.8259
1060	1114.85	143.91	810.61	4.911	3.8478
1080	1137.93	155.15	827.94	4.641	3.8694
1100	1161.07	167.07	845.34	4.390	3.8906
1120	1184.28	179.71	862.85	4.156	3.9116
1140	1207.54	193.07	880.37	3.937	3.9322
1160	1230.90	207.24	897.98	3.732	3.9525
1180	1254.34	222.2	915.68	3.541	3.9725
1200	1277.79	238.0	933.40	3.362	3.9922
1220	1301.33	254.7	951.19	3.194	4.0117
1240	1324.89	272.3	969.01	3.037	4.0308
1260	1348.55	290.8	986.92	2.889	4.0497
1280	1372.25	310.4	1004.88	2.750	4.0684
1300	1395.97	330.9	1022.88	2.619	4.0868
1320	1419.77	352.5	1040.93	2.497	4.1049
1340	1443.61	375.3	1059.03	2.381	4.1229
1360	1467.50	399.1	1077.17	2.272	4.1406
1380	1491.43	424.2	1095.36	2.169	4.1580
1400	1515.41	450.5	1113.62	2.072	4.1753
1420	1539.44	478.0	1131.90	1.9808	4.1923
1440	1563.49	506.9	1150.23	1.8942	4.2092

Table A.10 (Continued)

T , K	h , kJ/kg	P_r	u , kJ/kg	v_4	s° , kJ/kg K
1460	1587.61	537.1	1168.61	1.8124	4.2258
1480	1611.80	568.8	1187.03	1.7350	4.2422
1500	1635.99	601.9	1205.47	1.6617	4.2585

^a Adapted from Table 1 in *Gas Tables*, by Joseph H. Keenan and Joseph Kaye. Copyright 1948, by Joseph H. Keenan and Joseph Kaye. Published by John Wiley & Sons, Inc., New York.

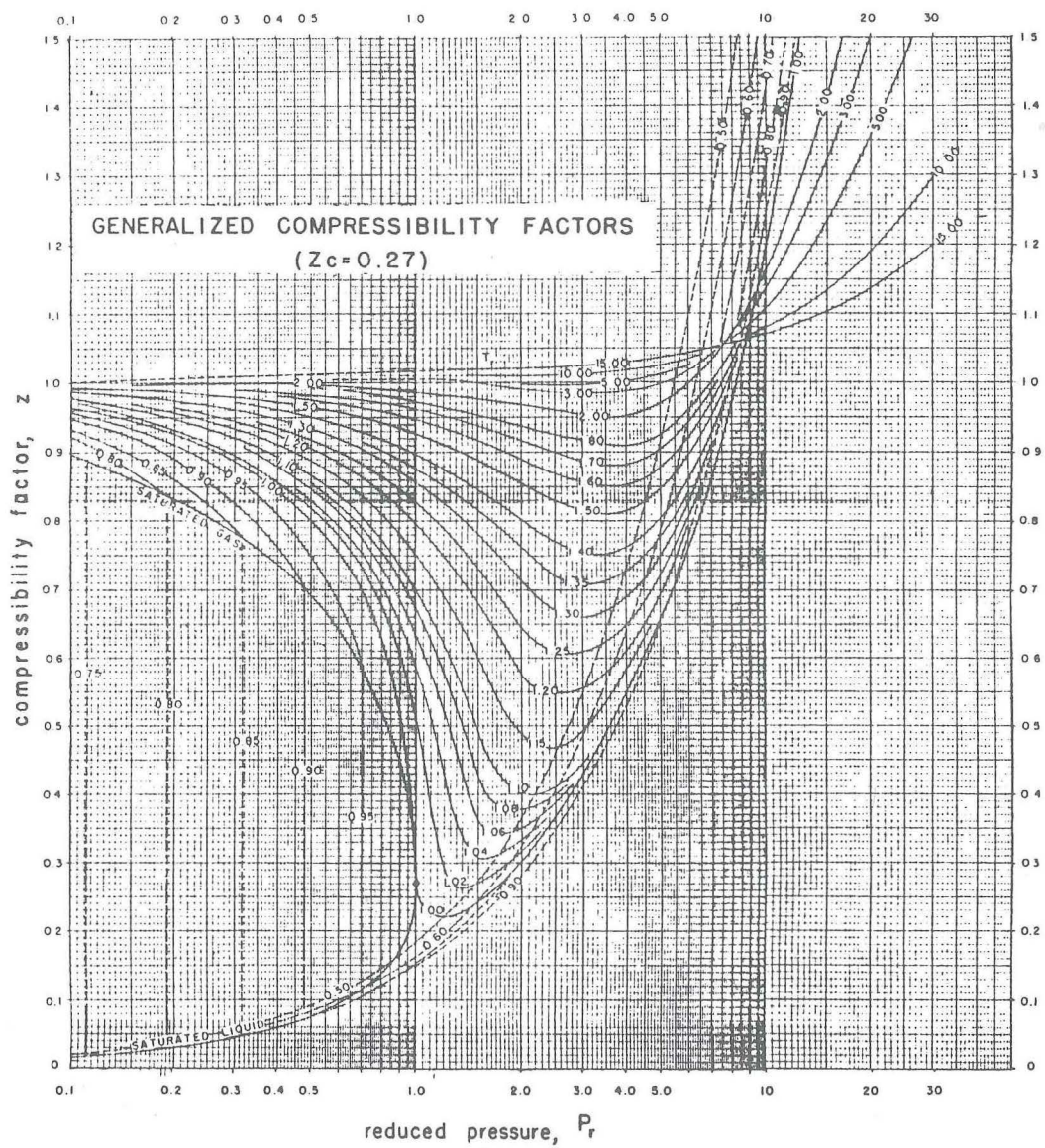


Fig. A.5 Generalized compressibility chart.

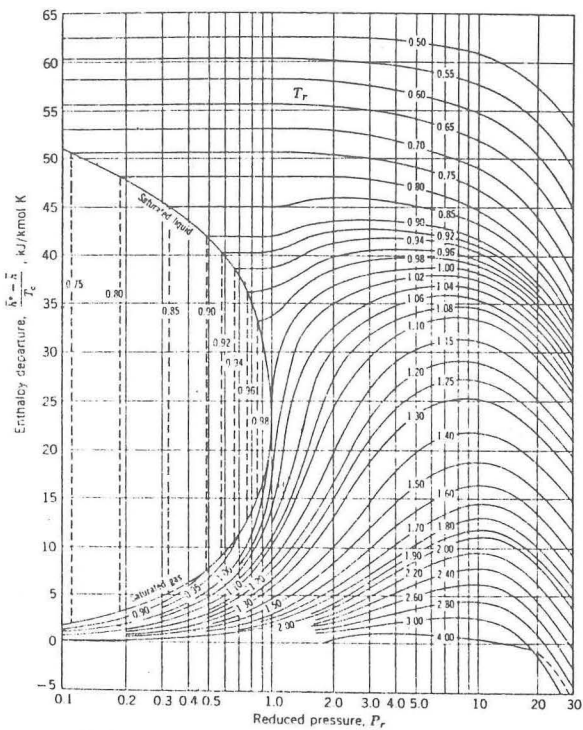


Fig. A.6 Generalized enthalpy correction chart (Based on Fig. A.5).

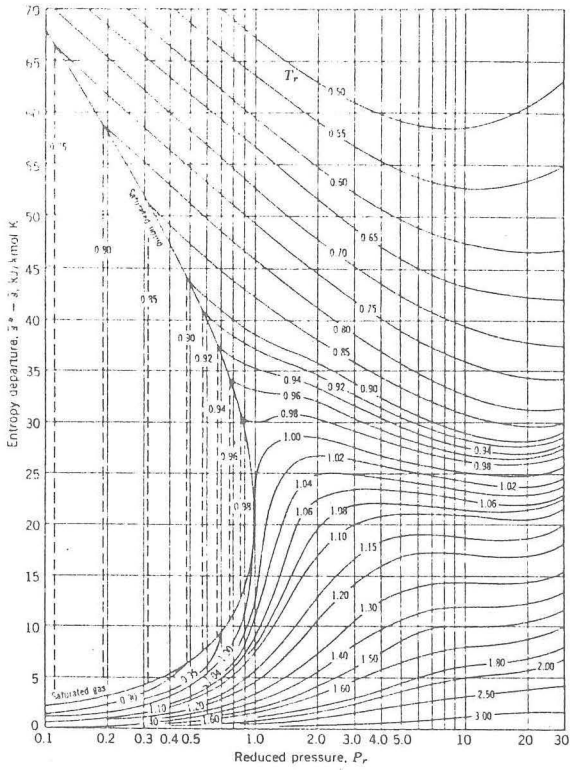


Fig. A.8 Generalized entropy correction chart (Based on Fig. A.5).

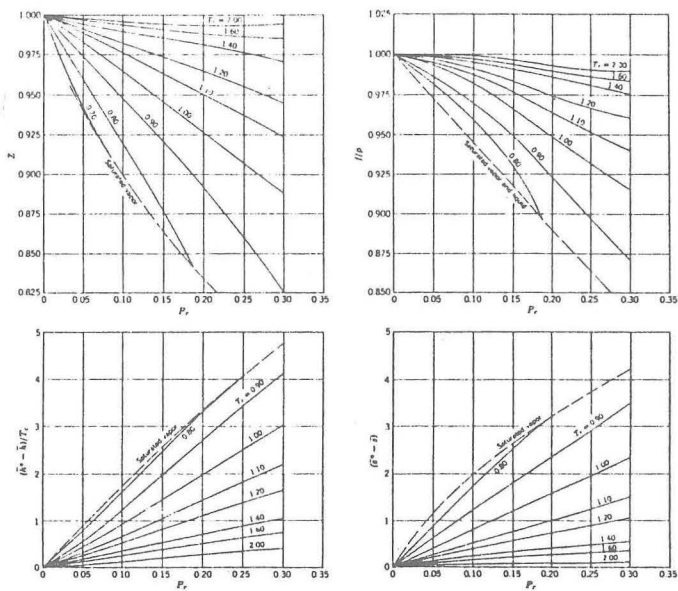


Fig. A.9 Generalized charts at low pressure.

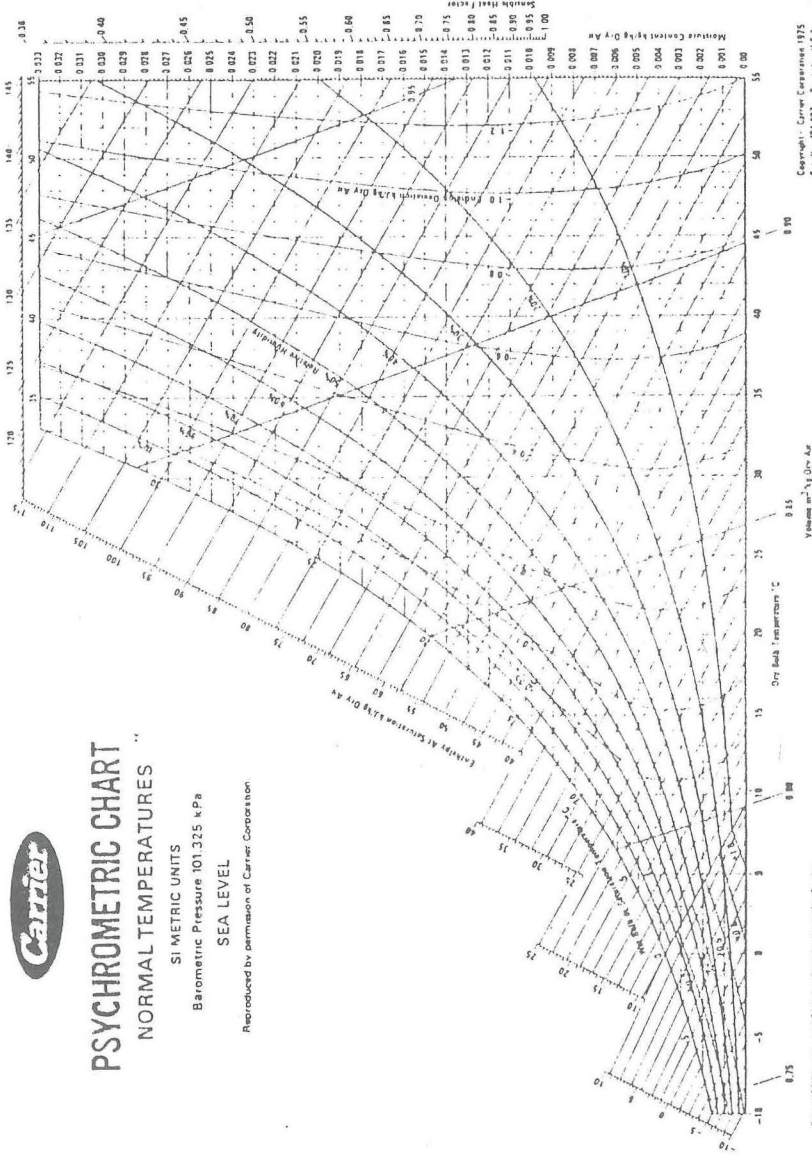


PSYCHROMETRIC CHART

NORMAL TEMPERATURES

SI METRIC UNITS
 Barometric Pressure 101.325 kPa
 SEA LEVEL

Reproduced by permission of Carrier Corporation



Copyright © Carrier Corporation 1975
 Cat. No. 75A-002 Printed in U.S.A.

Volume m^3/l Dry Air

Below 0°C Properties and Enthalpy Deviation from Air Fuel

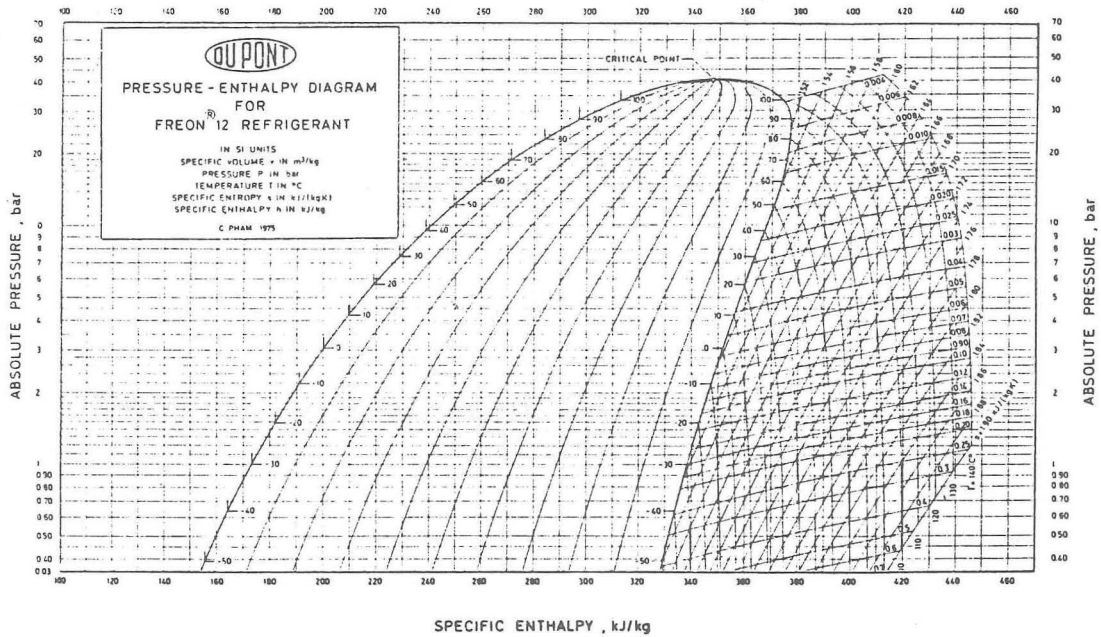


FIG. A. 12.

TERMODINÁMICA I:
TEORÍA Y PROBLEMAS RESUELTOS
se terminó de imprimir en el mes de agosto
de 1994, en los talleres gráficos de
Editorial e Imprenta DESA S.A.
(Reg. Ind. 16521) General Varela 1577
Lima 5, Perú

